

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CAMPUS DE CURITIBANOS

CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS

Fernanda Oliveira da Silva

HydIrrig:

**UM PACOTE PARA O DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE
SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO**

Curitibanos

2018

Fernanda Oliveira da Silva

HydIrrig:
UM PACOTE PARA O DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO DE SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Agronomia do Centro de Ciências Rurais da
Universidade Federal de Santa Catarina como
requisito para a obtenção do Título de Bacharel em
Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. João Batista Tolentino Júnior

Curitiba

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Fernanda Oliveira
Hydirrig : UM PACOTE PARA O DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO
DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO / Fernanda Oliveira Silva ;
orientador, João Batista Tolentino Júnior, 2018.
98 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus
Curitibanos, Graduação em Agronomia, Curitibanos, 2018.

Inclui referências.

1. Agronomia. 2. Modelagem Hidráulica. 3. Irrigação. 4.
backstep. I. Batista Tolentino Júnior, João. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Agronomia. III. Título.

HydIrrig.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao Colegiado do Curso de Agronomia,
do Campus Curitibanos da Universidade Federal de
Santa Catarina, como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: João Batista Tolentino Júnior

Data da defesa: 15/06/2018

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA:



Presidente e Orientador: João Batista Tolentino Júnior
Titulação Doutor
Área de concentração em Irrigação e Drenagem
Universidade Federal de Santa Catarina



Membro Titular: Eliseu Fritscher
Titulação Doutor
Área de concentração em Matemática Aplicada
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina



Membro Titular: Guilherme Jurkevick Delben
Titulação Doutor
Área de concentração em Física
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Local: Universidade Federal de Santa Catarina
Campus de Curitibanos
Coordenação do Curso de Graduação em Agronomia

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. João Batista Tolentino Júnior, pela oportunidade, dedicação, paciência, orientação e atenção na execução deste trabalho, que teve início em uma Iniciação Científica.

À minha família que sempre me incentivou.

Aos professores Dra. Adriana Terumi Itako, Dr. Alexandre ten Caten, Dr. Alexandre Magno da Silva Santos, Dra. Karine Louise dos Santos pelas aulas ministradas que contribuíram significativamente para a minha formação.

RESUMO

Ao longo dos anos diversos modelos matemáticos foram propostos para o dimensionamento hidráulico. A modelagem hidráulica é uma simplificação da realidade de sistemas complexos. Neste trabalho, desenvolveram-se equações numéricas a partir das equações básicas da hidráulica: Equação de Bernoulli, Equação da Continuidade e Equação Universal da Perda de Carga com fator f calculado pela Equação de Colebrook-White. Foi utilizando o método backstep para realizar o cálculo passo a passo. Essas equações foram implementadas em linguagem R no formato de funções e agrupadas em um pacote denominado HydIrrig. A aplicação uniforme e a vazão média dos emissores são parâmetros importantes para o dimensionamento hidráulico, neste contexto se utilizou esses parâmetros como condições de restrição no algoritmo, para determinar a pressão no início da linha lateral ou na subunidade de irrigação. Foram desenvolvidas 10 funções com diferentes finalidades: *ll* a fim de dimensionar uma linha lateral; *hf* quantificar a perda de carga; *coefic* calcular os coeficientes da linha lateral; *subuni* define uma subunidade de irrigação, composta por linhas laterais e linha de derivação; *llh* indica a pressão no início de uma linha lateral; *subunih* estabelece a pressão no início de uma linha lateral em uma subunidade; *lld* define o diâmetro de uma linha lateral; *subunid* estabelece o diâmetro das linhas laterais em uma subunidade. Para estabelecer o dimensionamento hidráulico, foram desenvolvidas ainda as funções *llhd* e *subunihd* que estabelecem, respectivamente, a pressão e diâmetro necessários no início de uma linha lateral ou de uma subunidade. As funções desenvolvidas em R apresentaram alta acurácia na resolução, sendo que o tempo de execução das funções foi insignificante. O HydIrrig se apresentou como uma ferramenta prática e rápida para o dimensionamento hidráulico. O pacote está disponível na plataforma GitHub: <https://github.com/FernandaFOS/HydIrrig>.

Palavras-chaves: Modelagem hidráulica. Irrigação. Backstep.

ABSTRACT

Various mathematical models were proposed for hydraulic design over the years. Hydraulic modeling is a simplification of complex systems. In this work, numerical equations were developed from basic hydraulic equations: Bernoulli equation, Continuity equation, and Darcy–Weisbach equation with factor f calculated by the Colebrook–White equation. The backstep method was used to perform all the steps of the calculation. These equations were implemented in programming language R by functions and grouped into a package named HydIrrig. Important parameters in hydraulic design are uniform application and average emitter flow rate. In this context, these parameters were applied as restrictions on the algorithm, to determine the pressure at the start of the lateral line or in the irrigation subunit. Ten functions were developed with different purposes: *ll* to design a lateral line; *hf* to quantify head loss; *coefic* to calculate the coefficients of the lateral line; *subuni* to define an irrigation subunit with lateral line and the manifold; *llh* to determine the pressure at the start of the lateral line; *subunih* to establish the pressure at the start of a lateral line in a subunit; *lld* to set the diameter of a lateral line; *subunid* to establish the diameter of lateral lines in a subunit. In order to enhance the hydraulic design, the functions *llhd* and *subunihd* were established to set the diameter and pressure required at the start of a lateral line or a subunit. Our functions in language R showed high accuracy in resolution, and runtime was insignificant. HydIrrig performed as a practical and fast tool for hydraulic designing. The package is available on Git Hub platform: <https://github.com/FernandaFOS/HydIrrig>.

Keywords: Hydraulic Modeling. Irrigation. Backstep.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Incremento anual da área irrigada.....	19
Figura 2 - Composição do sistema de irrigação.	24
Figura 3 - Dimensionamento da linha lateral pelo método backstep.	30
Figura 4 - Matriz de um sistema de irrigação representada pelas linhas laterais e emissores. .	33
Figura 5 - Perfil de pressão nas situações de sem declive, com aclave e declive.	39
Figura 6 - a) Equação Potência (sem declividade). b) Equação Linear (sem declividade).	41
Figura 7 - a) Relação pressão inicial e vazão inicial em declive de 1%. b) Relação pressão inicial e pressão final com declive de 1%.....	42
Figura 8 - Variação da vazão na subunidade.....	45
Figura 9 - Variação da pressão na subunidade.	45
Figura 10 - Pacote HydIrrig.....	58
Figura 11- Funções disponíveis no HydIrrig.....	58
Figura 12 - <i>Help</i> HydIrrig.....	59
Figura 13 - Como usar e descrição dos parâmetros da função.	59
Figura 14 Resultados e exemplos.	60
Figura 15 - Diagrama de Moody.	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultado da função hf para um regime turbulento.....	36
Quadro 2 - Função hf regime laminar.....	37
Quadro 3 - Dimensionamento da linha lateral sem declividade.....	38
Quadro 4 - Dimensionamento da linha lateral em aclave.	38
Quadro 5 - Dimensionamento da linha lateral em declive.	39
Quadro 6 - Perfil de pressões com declive de 1%.	40
Quadro 7 - Perfil de pressões na linha lateral sem declive.....	40
Quadro 8 - Perfil de pressões para aclave 1%.	41
Quadro 9 - Coeficientes da Linha Lateral sem declive.	43
Quadro 10 - Coeficientes da Linha Lateral com declive.	43
Quadro 11 - Parâmetros da função $subuni$	44
Quadro 12 - Dimensionamento da subunidade.	44
Quadro 13 - Estabelecer variação da vazão pela alteração do diâmetro (sem declividade).	47
Quadro 14 - Estabelecer a variação da vazão pela alteração do diâmetro (com aclave).....	47
Quadro 15 - Estabelecer a variação da vazão pela alteração do diâmetro (com declive).....	48
Quadro 16 - Estabelecer a vazão requerida no emissor pela alteração da pressão no final da linha lateral.	48
Quadro 17 - Função llh com aclave de 4%.	49
Quadro 18 - Função llh em declive de 4%.	49
Quadro 19 - Estabelecer a pressão inicial na linha lateral pelo diâmetro sem declividade.	50
Quadro 20 - Estabelecer a pressão inicial na linha lateral pelo diâmetro em aclave.	51
Quadro 21 - Estabelecer a pressão inicial na linha lateral pelo diâmetro em declive.	51
Quadro 22 - Estudo de caso com a aplicação de um diâmetro em cm.	52
Quadro 23 - Estabelecer a variação da vazão pelo diâmetro para a subunidade.	53
Quadro 24 - Estabelecer a variação da vazão pelo diâmetro com declividade de 1%.	54
Quadro 25 - Estabelecer a variação da vazão pelo diâmetro para a subunidade.	54
Quadro 26 - Função $subunih$ sem declividade.	55
Quadro 27 - Função $subunih$ em aclave.....	56
Quadro 28 - Função $subunih$ em declive.....	56
Quadro 29 - Ajuste da subunidade de diâmetro e pressão final.	57
Quadro 30 - Script Função hf	72

Quadro 31 - Continuação Script Função <i>hf</i> .	73
Quadro 32 - Script Função <i>Coefic</i> .	74
Quadro 33 - Continuação Script Função <i>Coefic</i> .	75
Quadro 34 - Script Função <i>ll</i> .	76
Quadro 35 - Continuação Script Função <i>ll</i> .	77
Quadro 36 - Script Função <i>lld</i> .	78
Quadro 37 - Continuação Script Função <i>lld</i> .	79
Quadro 38 - Continuação Script Função <i>lld</i> .	80
Quadro 39 - Script Função <i>llh</i> .	81
Quadro 40 - Continuação Script Função <i>llh</i> .	82
Quadro 41 - Continuação Script Função <i>llh</i> .	83
Quadro 42 - Script Função <i>llhd</i> .	84
Quadro 43 - Continuação Script Função <i>llhd</i> .	85
Quadro 44 - Continuação Script Função <i>llhd</i> .	86
Quadro 45 - Script Função <i>subuni</i> .	87
Quadro 46 - Continuação Script Função <i>subuni</i> .	88
Quadro 47 - Script Função <i>sudunid</i> .	89
Quadro 48 - Continuação Script Função <i>sudunid</i> .	90
Quadro 49 - Continuação Script Função <i>sudunid</i> .	91
Quadro 50 - Script Função <i>subunih</i> .	92
Quadro 51 - Continuação Script Função <i>subunih</i> .	93
Quadro 52 - Continuação Script Função <i>subunih</i> .	94
Quadro 53 - Continuação Script Função <i>subunih</i> .	95
Quadro 54 - Script Função <i>subunidh</i> .	96
Quadro 55 - Continuação Script Função <i>subunidh</i> .	97
Quadro 56 - Continuação Script Função <i>subunidh</i> .	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

\vec{A}	– Área da seção, m ²
A	– Área da seção de escoamento, m ²
c	– Coeficiente da linha de derivação
D	– Diâmetro, m
f	– Fator de atrito, adimensional
g	– Aceleração gravitacional, m.s ²
H ₁	– Pressão no primeiro emissor, mca
H _n	– Pressão no emissor n, mca
H _{i-1}	– Pressão no emissor n-1, mca
hf	– Perda de carga, m
Hf ₁	– Perda de carga no início da linha lateral, m
Hf _{1→2}	– Perda de carga de carga do ponto 1 até ponto 2, m
hf (Q _{i-1})	– Perda de carga no elemento i-1 da linha lateral em função da vazão Q _{i-1} , m
H _{fim}	– Pressão no último emissor, mca
H _{fim LD}	– Pressão no final da linha de derivação, mca
H _{ini}	– Pressão no início da linha lateral, mca
H _{LD}	– Pressão no início da linha de derivação, mca
H _n	– Pressão no enésimo emissor, mca
L	– Comprimento da linha, m
LL	– Linha Lateral, adimensional
K	– Coeficiente de emissão, adimensional
max _q	– Máxima vazão, m ³ .s ⁻¹
mean _q	– Média da vazão, m ³ .s ⁻¹
min _q	– Mínima vazão, m ³ .s ⁻¹
i	– Número de emissores, unidade
p ₁	– Pressão no ponto 1, mca
p ₂	– Pressão no ponto 2, mca
Q	– Vazão, m ³ .s ⁻¹
Q ₁	– Vazão no primeiro elemento da linha lateral, m ³ .s ⁻¹
q ₁	– Vazão no primeiro emissor, m ³ .s ⁻¹
Q _i	– vazão no elemento i da linha lateral, m ³ .s ⁻¹

q_i – Vazão no emissor i , $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
 Q_{i-1} – Vazão no elemento $i-1$ da linha lateral, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
 Q_{i-1} – Vazão no emissor $i-1$, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
 Q_{ini} – Vazão no início da linha lateral, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
 Q_n – Vazão no último elemento da linha, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
 q_n – Vazão no n -ésimo emissor, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
 q_{req} – Vazão requerida, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
 q_{vr} – Variação da vazão, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
 Re – Número de Reynolds, adimensional
 Se – Espaçamento entre os emissores, m
 V – Velocidade seção, $\text{m}.\text{s}^{-1}$
 \vec{V} – Velocidade média da seção, $\text{m}.\text{s}^{-1}$
 V_1 – Velocidade no ponto 1, $\text{m}.\text{s}^{-1}$
 V_2 – Velocidade no ponto 2, $\text{m}.\text{s}^{-1}$
 ν – Viscosidade cinética do fluido, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$
 x – Expoente de emissão, adimensional
 Z_1 – Cota no ponto 1, mca
 Z_2 – Cota no ponto 2, mca
 γ_1 – Peso específico no ponto 1, $\text{N}.\text{m}^{-3}$
 γ_2 – Peso específico no ponto 2, $\text{N}.\text{m}^{-3}$
 ϵ – Coeficiente de rugosidade, adimensional
 ν – Viscosidade cinética do fluido, $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	IRRIGAÇÃO.....	17
2.2	IRRIGAÇÃO LOCALIZADA	18
2.3	EQUAÇÕES BÁSICAS DA HIDRÁULICA	19
2.3.1	Equação da Continuidade	19
2.3.2	Equação de Bernoulli	20
2.3.3	Equação de Perda de Carga	21
2.4	SISTEMA HIDRÁULICO	23
2.5	UNIFORMIDADE DE IRRIGAÇÃO.....	24
2.6	MODELOS MATEMÁTICOS E SOFTWARES APLICADOS AO DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO.....	26
2.7	SOFTWARE R.....	27
2.7.1	Pacotes do software R	27
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	PERDA DE CARGA.....	29
3.2	BACKSTEP.....	30
3.3	SUBUNIDADE.....	32
3.4	ESTABELECE A LINHA LATERAL.....	33
3.5	ESTABELECE UMA SUBUNIDADE.....	34
3.6	PACOTE HydIrrig	35
4	RESULTADOS.....	36

4.1	PERDA DE CARGA.....	36
4.2	LINHA LATERAL	37
4.3	LINHA DE DERIVAÇÃO	41
4.4	SUBUNIDADE	43
4.5	ESTABELECE A LINHA LATERAL.....	46
4.6	ESTABELECE A SUBUNIDA DE	52
4.7	PACOTE HydIrrig	58
5	DISCUSSÃO	61
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66
	APÊNDICE A – Função hf.....	72
	APÊNDICE B – Função $coefic$	74
	APÊNDICE C – Função ll	76
	APÊNDICE D – Função lld	78
	APÊNDICE E – Função llh	81
	APÊNDICE F – Função $llhd$.....	84
	APÊNDICE G – Função $subuni$.....	87
	APÊNDICE H – Função $subunid$.....	89
	APÊNDICE I – Função $subunih$	92
	APÊNDICE J – Função $subunihd$.....	96

1 INTRODUÇÃO

A grande quantidade de água requerida para a irrigação e o decréscimo de sua disponibilidade têm aumentado o interesse pela racionalização desse recurso. A irrigação é responsável por consumir cerca de 70% do total da água doce, e isso faz com que sejam impostas pressões sobre a utilização do recurso hídrico (WWDR, 2012, 2018; ANA, 2017).

O sistema hidráulico de um sistema de irrigação é composto pelas linhas principais, linhas de derivação, linhas lateral e os emissores, responsáveis por disponibilizar a água para as plantas. O desempenho dos sistemas de irrigação depende muito do projeto hidráulico adequado (CLARK et al., 2007). As principais tarefas do cálculo de dimensionamento hidráulico de um sistema de irrigação por gotejamento são determinar as características geométricas (diâmetro e comprimento) das linhas laterais, das linhas de derivação e a linha principal, a pressão no início das linhas; a perda de carga e a vazão dos emissores, com objetivo de atender algum critério de dimensionamento do sistema ainda em fase de projeto. Muitos autores utilizam a uniformidade como critério para desenvolver o melhor design para o sistema de irrigação por gotejamento (YILDIRIM, 2015). De acordo com Agiralioglu e Yildirim (2002) o design do sistema de irrigação por gotejamento é limitado pela uniformidade e consequentemente pela perda de carga.

O dimensionamento hidráulico foi estudado por diversos autores, com destaque na utilização do método backstep assistido por meio da computação (BUCKS; MYERS, 1973; WU; GILTIN, 1973; HOWELL; HILER, 1974; YITAYEW; WARRICK, 1988; SCALOPPI; ALLEN, 1993; HATHOOT; AL-AMOUD; MOHAMMAD, 1993, 2000; KANG; NISHIYAMA, 1996a, b; VALLESQUINO; LUQUE-ESCAMILLA, 2001, 2002; JUANA et al., 2004; YILDIRIM, 2008, 2009, 2010).

De acordo com Wu (1997), determinar a correta pressão é de suma importância para não comprometer o sistema, pois altas pressões podem resultar em falhas na aplicação de água que tem como consequência afetar o crescimento e desenvolvimento da cultura (TAIZ et al., 2017), ou ainda resultar em lesões nas tubulações de irrigação (CLARK et al., 2007).

A modelagem hidráulica é uma simplificação da realidade de sistemas complexos, que pode ser descrita por meio de equações matemáticas (ANDRADE; OGLIARI, 2010). O correto dimensionamento hidráulico de um sistema de irrigação localizada garante a menor variação de vazão entre os emissores, sendo assim, garantindo uma aplicação uniforme da água.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver equações matemáticas para o dimensionamento hidráulico de uma subunidade irrigação por gotejamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Deduzir modelo numérico para o dimensionamento hidráulico, por meio da técnica do backstep. Utilizar as equações para dimensionar sistemas de irrigação atendendo condições de uniformidade, vazão e pressão requeridas.

A partir das equações deduzidas anteriormente, implementar funções na linguagem computacional R, no formato de um pacote denominado *HydIrrig*, para se resolver as equações mais facilmente e em menor tempo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A agricultura irrigada vem aumentando em escala nos últimos anos no Brasil. Todavia, com alta disponibilidade dos recursos hídricos no país não se tem uma preocupação com o uso racional da água, levando à baixa eficiência de sistemas de irrigação. Esta pode ser atribuída, entre outros, ao manejo inadequado e ao dimensionamento hidráulico errôneo. Nesse contexto, se torna de suma importância a utilização de softwares para o dimensionamento hidráulico de um sistema de irrigação, cujo benefício é reduzir o tempo aplicado na execução dos cálculos e analisar rapidamente diferentes situações. O dimensionamento correto das linhas laterais e de derivação tem como vantagem a correta distribuição de água no perfil do solo para as plantas e o uso racional do recurso hídrico. Com o auxílio do pacote proposto, será possível automatizar os cálculos pelo algoritmo desenvolvido e maximizar a precisão nos resultados, prevenindo erros grosseiros do usuário que possam comprometer o projeto hidráulico e a aplicação uniforme da água.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 IRRIGAÇÃO

A irrigação é a prática agrícola que utiliza um conjunto de equipamentos e técnicas para suprir a deficiência total ou parcial de água para as plantas (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2013). A água é um recurso imprescindível para a vida, e na agricultura a sua falta afeta a produtividade das culturas. Os nutrientes são transportados e absorvidos por meio de reações químicas na planta, o excesso ou a falta de água afeta diretamente o crescimento e desenvolvimento da planta (TAIZ et al., 2017).

A prática da irrigação ocorre desde as antigas civilizações, mas nos últimos anos se desenvolveu acentuadamente por oferecer diversas vantagens, das quais se destaca o aumento da produção agrícola. China e Índia conseguiram triplicar suas produções nos últimos 25 anos, por meio de investimentos na irrigação (FAO, 2011).

A irrigação é responsável por consumir cerca de 70% do total da água doce, mas nos países em desenvolvimento esse valor pode chegar a 90%. A grande quantidade de água utilizada na agricultura irrigada faz com que sejam impostas pressões sobre a utilização do recurso hídrico (WWDR, 2012, 2018; ANA, 2017).

A agricultura irrigada se desenvolveu a princípio em regiões em que a quantidade, distribuição espacial e temporal das chuvas não eram capazes de suprir a demanda de água para as culturas. Neste contexto a atividade no Brasil iniciou-se em 1900 com a produção do arroz no estado do Rio Grande do Sul, e mais tarde na década de 1970 e 1980 ocorreu a intensificação da atividade em outras regiões do país (ANA, 2017).

O Brasil está entre os dez países com maior área equipada para a irrigação do mundo, apresenta-se no grupo dos países que possuem uma área de 4 a 7 Mha, ao lado de Tailândia, México, Indonésia, Turquia, Bangladesh, Vietnã, Uzbequistão, Itália e Espanha (FAO, 2017). Os estados brasileiros que se destacam com maior área são Rio Grande do Sul e São Paulo, com pouco mais de 1 milhão de hectares irrigados cada, e Minas Gerais, com mais de 820 mil hectares irrigados (ANA, 2013).

A agricultura irrigada faz um uso consuntivo de água, ou seja, altera suas condições na medida em que a retira do ambiente e a maior parte é consumida pela evapotranspiração da planta e solo, não retornando diretamente aos corpos hídricos. Conforme dados da Agência Nacional das Águas (ANA, 2017) atualmente a irrigação é responsável pela retirada de 969

mil litros por segundo ($969 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) e pelo consumo de 745 mil litros por segundo ($745 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Analisando os usos consuntivos, foi constatado que a irrigação é responsável por 46% da retirada e 67% da vazão consumida em relação as outras atividades que consomem água no Brasil. Segundo Maupin et al. (2014), os dados de consumo de água para a irrigação se assemelham com os dados dos EUA.

A produção irrigada apresenta uma alta demanda por água, todavia, se tem como resposta o aumento da produção agrícola (FAO, 2011). O grande desafio é desenvolver técnicas eficientes que tragam retorno social e econômico, sem que concorra por água destinada ao abastecimento urbano (FGV EESP; GV AGRO, 2016). Um estudo realizado apontou que até 2025, cerca de 55% municípios brasileiros vão enfrentar problemas de abastecimento de água decorrentes da qualidade dos corpos hídricos ou por escassez, aumentando o conflito do uso da água (ANA, 2017).

A agricultura é talvez o setor econômico mais afetado pela crescente variabilidade dos recursos hídricos em âmbito mundial, e certamente o mais vulnerável em termos socioeconômicos. As comunidades rurais em países em desenvolvimento dependem fortemente da água. O setor absorve em média 84% dos impactos econômicos adversos das secas, e 25% de todos os danos causados por desastres relacionados ao clima (FAO, 2015).

2.2 IRRIGAÇÃO LOCALIZADA

Os métodos de irrigação são classificados conforme a aplicação da água, separados em quatro métodos: superfície, subterrânea, por aspersão e localizada (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2013).

Os emissores da irrigação localizada são pequenos dispositivos que tem como função distribuir a água. São projetados para dissipar a pressão e descarregar constantemente um fluxo de água pequeno e uniforme. Se diferencia dos demais por apresentar alta eficiência, uma vez que a aplicação é próxima ao sistema radicular, em pequenas quantidades e altas frequências, mantendo a umidade do solo próxima à capacidade de campo (CASTIBLANCO, 2013; MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2013).

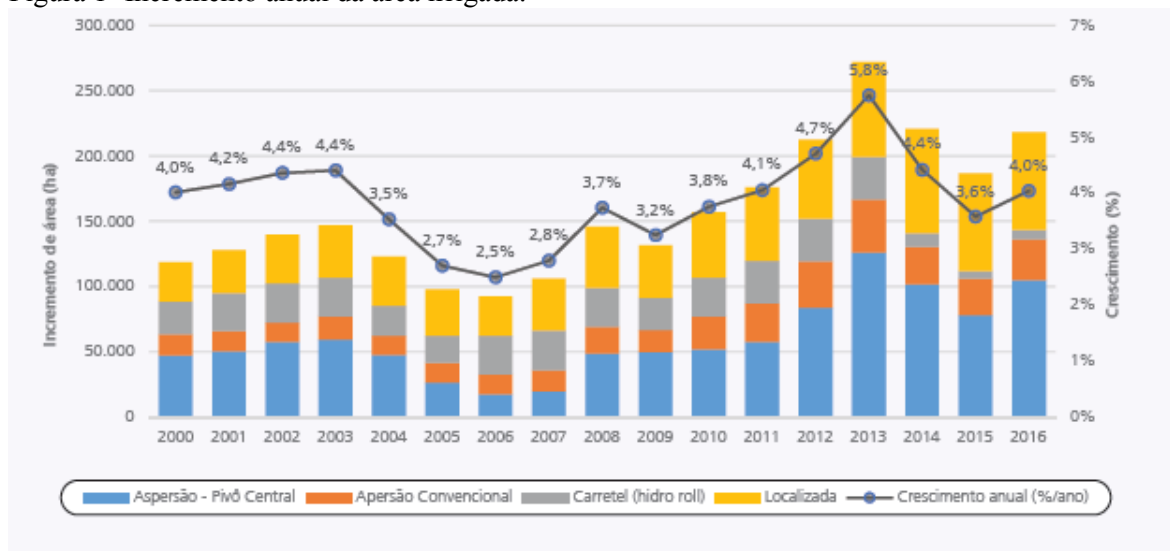
O desempenho dos sistemas de irrigação depende muito do projeto hidráulico adequado (CLARK et al., 2005). Quando planejado, apresenta diversas vantagens, que incluem o aumento da produtividade lavouras, melhora o rendimento e qualidade, melhor manejo dos nutrientes, diminuição das perdas de água e utilização de água de menor qualidade. Há uma economia em mão de obra, por utilizar o sistema fixo, maior eficiência no

controle fitossanitário, já que não ocorre o molhamento superficial das folhas otimizando a aplicação de defensivos (AYARS, 2007; CASTIBLANCO, 2013).

As desvantagens que podem ser citadas são o custo inicial elevado por ser um sistema fixo, problemas com entupimentos, devido aos pequenos diâmetros dos emissores e pela baixa velocidade da água ou de origem de partículas de areia, fertilizantes e precipitados químicos; inviabilizando em águas com alto teor de ferro e carbono e a manutenção deve ser realizada com alta frequência (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2011; CASTIBLANCO, 2013).

No período de 2006 a 2017, 70% do incremento de água anuais da área irrigada se referiu ao grupo de maior eficiência de água no País – irrigação localizada (gotejamento e microaspersão) e aspersão por pivô central, Figura 1 (ANA, 2017).

Figura 1- Incremento anual da área irrigada.



Fonte: ANA, 2017.

2.3 EQUAÇÕES BÁSICAS DA HIDRÁULICA

2.3.1 Equação da Continuidade

A Equação da Continuidade (Equação 1) é de suma importância para problemas de hidrodinâmica, uma vez que se aplica ao princípio de conservação de massa, ou seja, a massa do sistema permanece constante para líquidos incompressíveis (AZEVEDO NETTO et al., 2015). Pode-se dizer que a taxa de aumento da massa no volume de controle é devida ao fluxo líquido de entrada de massa (FOX et al., 2018).

$$Q = A.V \quad (1)$$

Em que:

Q – vazão, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$;

A – área da seção de escoamento, m^2 ;

V – velocidade da seção, $\text{m}.\text{s}^{-1}$.

A Equação 1 é comumente chamada taxa de fluxo de volume, vazão em volume ou ainda vazão volumétrica. Em um escoamento incompressível, a vazão de entrada em um volume de controle deve ser igual à vazão em volume para fora do volume de controle.

2.3.2 Equação de Bernoulli

A Equação de Bernoulli (Equação 2) é a mais famosa e utilizada em toda a mecânica dos fluidos. Foi deduzida a partir da Equação de Movimento de Euler para um escoamento incompressível e sem viscosidade. É uma equação algébrica simples que relaciona as variações de pressão com aquelas de velocidade e de elevação de um fluido. Entretanto, existem restrições para o seu uso: escoamento em regime permanente; escoamento incompressível; escoamento sem atrito e escoamento ao longo de uma linha de corrente (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, 2015; FOX et al., 2018).

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + Hf_{1 \rightarrow 2} \quad (2)$$

Em que:

p_1 – pressão no ponto 1, mca;

p_2 – pressão no ponto 2, mca;

γ_1 – peso específico no ponto 1, $\text{N}.\text{m}^{-3}$;

γ_2 – peso específico no ponto 2, $\text{N}.\text{m}^{-3}$;

V_1 – velocidade no ponto 1, $\text{m}.\text{s}^{-1}$;

V_2 – velocidade no ponto 2, $\text{m}.\text{s}^{-1}$;

Z_1 – cota no ponto 1, m;

Z_2 – cota no ponto 2, m;

$Hf_{1 \rightarrow 2}$ – perda de carga de carga do ponto 1 até ponto 2, m;
 g – aceleração da gravidade, m.s^{-2} .

Analizando-se a Equação de Bernoulli verifica-se a existência de três tipos de energia associada ao escoamento dos fluidos: energia de pressão (p/γ), energia cinética ($V^2/2 \cdot g$) e energia gravitacional (Z) (FOX et al., 2018).

A equação está associada à conservação de energia do fluido, que foi deduzida a partir das considerações de movimento, que é representada pela segunda lei de Newton ou Teorema Trabalho – Energia. A fórmula da equação de Bernoulli é idêntica à derivada da equação da energia (Equação 3) obtida pela aplicação da segunda lei da termodinâmica (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, 2015; FOX et al., 2018).

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + g \cdot z = \text{constante} \quad (3)$$

Em que:

ρ – massa específica, kg.m^{-3} .

2.3.3 Equação de Perda de Carga

A Perda de Carga, modelo matemático, é a soma das perdas maiores devido ao efeito do atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante, com as perdas localizada. Tem como fator as entradas, acessórios, variações de áreas entre outras (FOX et al., 2018).

A energia mecânica é convertida em energia térmica por efeito do atrito, que por sua vez representa a Perda de Carga. A Equação de Darcy-Weisbach (Equação 4) é a mais importante neste contexto, por envolver todas as variáveis relacionadas a perda de carga e possibilita considerar o tipo de regime (turbulento ou laminar). Devido à amplitude de seus usos, a mesma é também conhecida como Equação Universal (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, 2015; FOX et al., 2018).

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

Em que:

h_f – perda de carga, m;

f – fator de atrito, adimensional;

L – comprimento da linha, m;

V – velocidade, $m.s^{-1}$;

D – diâmetro, m;

g – aceleração gravitacional, $m.s^{-2}$.

O fator de atrito desempenha papel fundamental na análise de projetos hidráulicos. É um parâmetro complexo de se determinar, sendo influenciado pelo número de Reynolds (Re) que é descrito pela relação entre velocidade de escoamento do fluido, diâmetro da tubulação e viscosidade cinemática do fluido, descrita na Equação 5 (AZEVEDO NETTO; FERNÁNDEZ, 2015; ROMEO et al., 2002).

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (5)$$

Em que:

Re – Números de Reynolds, adimensional;

ν – viscosidade cinemática, $m^2.s^{-1}$.

Para fluxo laminar ($Re < 2000$), o coeficiente de atrito pode ser calculado pela equação 6, que depende exclusivamente do Número de Reynolds (Re).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

Em regime turbulento ($Re > 4000$), o coeficiente de atrito pode ser calculado pela Equação de Colebrook-White (Equação 7). Como o fator f está implícito nesta equação, ela deve ser resolvida numericamente, como por exemplo pelo método de Newton – Raphson.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

Em que:

ε - coeficiente de rugosidade, adimensional.

2.4 SISTEMA HIDRÁULICO

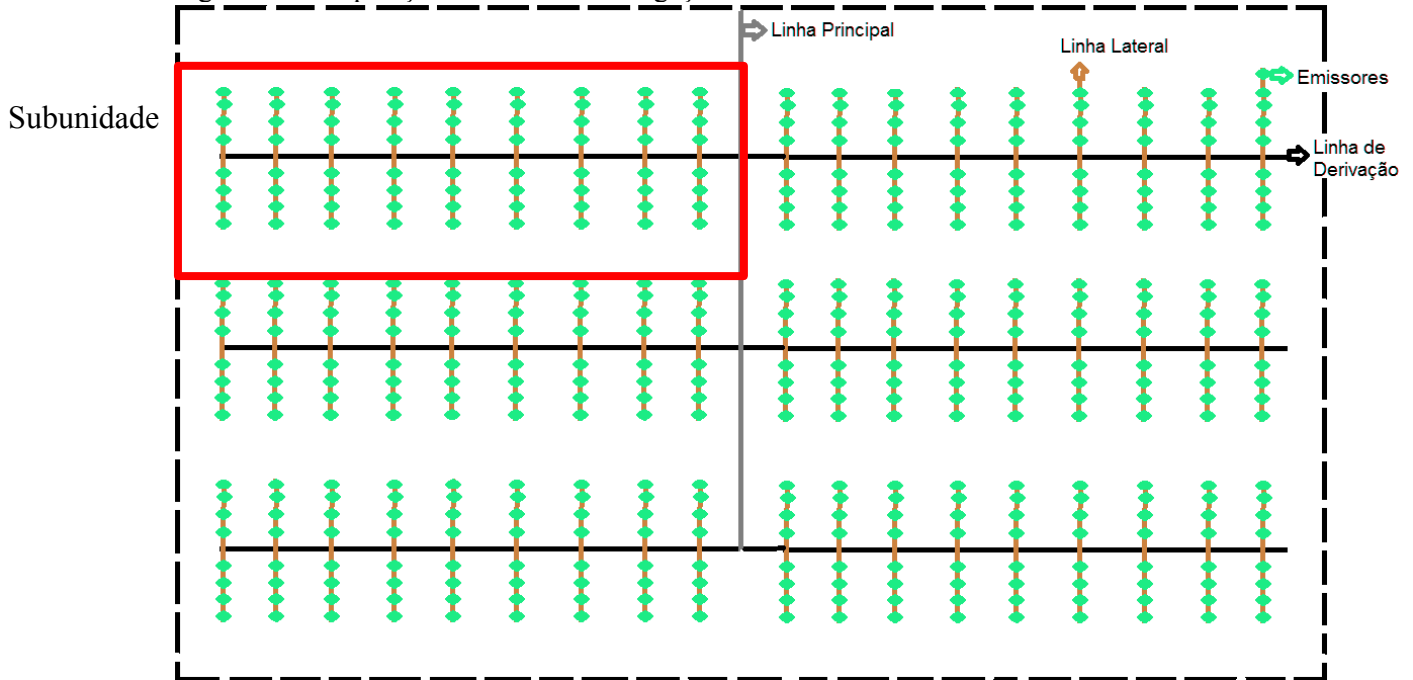
Diversas abordagens foram desenvolvidas para otimizar o design de um projeto de irrigação por gotejamento, por meio da análise hidráulica do fluxo (BUCKS; MYERS 1973, WU; GILTIN, 1973; HOWELL; HILER 1974). Muitos modelos matemáticos utilizaram o método backstep assistido por meio da computação (YITAYEW; WARRICK, 1988; SCALOPPI; ALLEN, 1993; HATHOOT et al., 1993, 2000; KANG; NISHIYAMA, 1996a, 1996b; VALLESQUINO; LUQUE-ESCAMILLA, 2001, 2002; JUANA et al., 2004; YILDIRIM, 2008, 2009, 2010).

O sistema é constituído de uma ou mais subunidades, em que a superfície que se irriga simultaneamente, desde o ponto onde se regula a pressão de entrada da água, é composta por: cabeçal de controle, linha principal, linha secundária, linha de derivação, linha lateral e emissores (Figura 2) (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). O projeto do sistema de irrigação inclui uma análise de energia para o dimensionamento adequado de todos os componentes, para garantir uma vazão desejada. O objetivo do projeto hidráulico é desenvolver um sistema confiável, uniforme e econômico (CLARK et al., 2005).

O diâmetro da linha principal obedece ao critério de limite de velocidade ($1,0 - 2,0 \text{ m.s}^{-1}$). Já para a linha de derivação e linha lateral, utiliza-se o critério da perda de carga admissível de 20% de pressão de serviço. Os emissores estão localizados na linha lateral, e são responsáveis pela aplicação da água na cultura, com vazões pequenas, variando de 2 a 20 L.h^{-1} (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

A uniformidade de um sistema de irrigação é uma medida quantitativa da vazão dos emissores ao longo de uma linha lateral ou de uma subunidade de irrigação. O dimensionamento da linha lateral é de suma importância, uma vez que a mesma é responsável por levar a água até os emissores, que são responsáveis pela distribuição da água para as plantas. Se o dimensionamento da mesma for negligenciado pode comprometer a uniformidade da aplicação (JAIN; SINGH; SINGH, 2002).

Figura 2 - Composição do sistema de irrigação.



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

De acordo com o IICA (2008) o sistema hidráulico no Brasil é constantemente negligenciado, fazendo com que 36% da água se perca no sistema. Essas perdas são atribuídas pela condução errônea e pela má distribuição nas estruturas hidráulicas.

2.5 UNIFORMIDADE DE IRRIGAÇÃO

As linhas laterais ou uma subunidade de irrigação localizada é uma estrutura hidráulica cujo design é limitado por uniformidade de irrigação e, conseqüentemente, pela Fricção Perdas de Cabeça (VALLESQUINO; LUQUE-ESCAMILLA, 2001).

Para se estimar a uniformidade é utilizado o Coeficiente de Uniformidade de Christiasen, (Equação 8), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (Equação 9), Coeficiente de Uniformidade Estatística (Equação 10) e a variação de fluxo lateral de emissor (Equação 14) (CHRISTIASSEN, 1942; WU; GITLIN, 1974; BERNARDO; SOARES; MONTOVANI, 2006).

$$CUC = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n [X_i - \bar{X}]^2}{n \cdot \bar{X}^2} \right) \quad (8)$$

Em que:

CUC – Coeficiente de Uniformidade de Christiasen (adimensional);

n - número de observações;

X_i – lâmina de água coletada no i -ésimo ponto sobre a superfície do solo, $L.h^{-1}$;

\bar{X} – lâmina média aplicada, $L.h^{-1}$.

$$CUD = 100 \cdot \frac{\overline{X_{25}}}{\bar{X}} \quad (9)$$

Em que:

CUD - Coeficiente de Uniformidade de Distribuição;

$\overline{X_{25}}$ – média das 25% menores descargas dos emissores, $L.h^{-1}$;

\bar{X} – média das descargas de todos emissores, $L.h^{-1}$;

$$CUE = 100 \cdot \left(1 - \frac{Sd}{Q_{med}}\right) \quad (10)$$

Em que:

CUE - Coeficiente de Uniformidade Estatística;

Sd – desvio padrão médio dos valores de precipitação, $L.h^{-1}$;

Q_{med} – média das vazões coletadas nos gotejadores na subárea, $L.h^{-1}$;

O parâmetro variação da vazão (Equação 11) é usado especificamente para projetos hidráulicos, uma vez que o perfil de pressão, bem como o perfil do fluxo do emissor são expressos por uma curva suave, tendo pouca variação do valor máximo e mínimo, sendo usado para demonstrar a uniformidade do sistema de desenho hidráulico (WU; GITLIN, 1974; CLARK et al., 2007).

$$q_{var} = \frac{q_{max} - q_{min}}{q_{max}} \cdot 100 \quad (11)$$

Em que:

q_{var} – variação do fluxo lateral dos emissores, porcentagem;

q_{max} – fluxo máximo da lateral dos emissores, $L.h^{-1}$;

q_{min} – fluxo mínimo da lateral dos emissores, $L.h^{-1}$;

Segundo Mantavani, Bernardo e Palaretti (2001) o CUC e CUD são classificados como excelentes quando acima de 90%. A classificação da variação de fluxo lateral do emissor deve ser igual ou inferior a 10%, de modo que a variação da vazão máxima e mínima não ultrapasse 10% na fase de projeto.

2.6 MODELOS MATEMÁTICOS E SOFTWARES APLICADOS AO DIMENSIONAMENTO DA IRRIGAÇÃO

Andrade e Ogliari (2010) comentam que um modelo é uma versão simplificada de algum evento, fenômeno ou acontecimento da vida real. Uma das suas finalidades é descrever e fazer previsões de eventos do mundo real. O modelo matemático é uma das maneiras que descreve adequadamente esses eventos, por meio de expressões matemáticas, sendo parte essencial da teoria (BARBOSA, 2009). Um modelo deve simplificar as coisas, sem menosprezar as variáveis relevantes para o entendimento do fenômeno em estudo.

Yuldirim e Agiralioglu (2004) fizeram uma comparação entre os métodos mais utilizados para descrever a relação da linha lateral. Os autores comentam que no forward-step (FSM), que é um método que utilizou o passo a passo, as condições de limite nos algoritmos de projeto podem ser estimadas, enquanto que para os outros métodos há valores fixos para determinados parâmetros de projeto. O método FSM forneceu valores mais precisos comparados aos outros métodos. O autor justifica por aplicar o cálculo para cada segmento de tubo, fornecendo o valor mais adequado da pressão de entrada e por utilizar as Equações Básicas da Hidráulica.

Keshtgar, Bhuiyan e Jayasuriya (2013), levaram a uniformidade ao extremo para um sistema de irrigação por gotejamento, propondo uma metodologia baseado em microtubos de comprimentos variáveis como emissores ao longo das linhas laterais, obtendo assim, uma uniformidade total de emissão, uma vez que reduziram a variabilidade de vazão.

Jiang e Kang (2010a), utilizaram a abordagem de linhas de gradientes de energia descrito por Wu (1975), Wu e Gitlin (1975) e Wu et al. (1986), que apresentam uma melhor forma da equação para avaliar a melhor posição da subunidade de acordo com as definições fornecidas por Keller e Bliesner (1990). A uniformidade de aplicação da água requerida foi usada como um parâmetro computacional no projeto, sendo que o autor destaca que as soluções finais podem ser obtidas de forma rápida e razoável.

Monserat, Barragan e Cots (2018), propuseram a utilização de equações básicas para a análise de um gotejador lateral baseado na linha do gradiente de energia, visto que os

mesmos propõem determinar o diâmetro do tubo lateral para um comprimento fixo. O procedimento proposto envolve a busca do diâmetro lateral que obtenha o máximo comprimento total.

Jain, Singh e Singh (2002) descreveram a utilização de uma equação do tipo potência para descrever a relação entre a pressão de entrada e a vazão de entrada da linha lateral devido à semelhança hidráulica entre linhas laterais e emissores. Os autores também demonstraram as vantagens da equação potência contra a equação polinomial.

O EPANET – IRRIGA é um aperfeiçoamento do EPANET que realiza o dimensionamento hidráulico por meio de linguagem computacional, é amplamente aceito para o dimensionamento do setor de abastecimento urbano. O EPANET – IRRIGA integra novas funções direcionadas ao dimensionamento hidráulico de sistema de irrigação, analisando o custo do projeto operacional. O software pode ser empregado para o dimensionamento de uma subunidade de irrigação, sendo para microaspersão, aspersão ou gotejamento (LUCENA, 2012).

Freitas et al. (2003) criaram o Gotejador que é um software desenvolvido em parceria entre a Cientec e a Petroisa Brasil, empresa do ramo de equipamentos para sistemas de irrigação. O sistema foi desenvolvido para ser uma ferramenta eficiente e eficaz no dimensionamento de sistema de irrigação por gotejadores e na tomada de decisão.

2.7 SOFTWARE R

R é uma linguagem e ambiente de desenvolvimento para estatística computacional, cálculos e gráficos e é altamente extensível, permitindo criação e modificação de suas funções. O programa utiliza scripts que possibilitam criar interações, loops e outras ferramentas para a automatização de cálculos, e possui bibliotecas para funções específicas que são denominadas pacotes (WICKHAM, 2015; VENABLES; SMITH, 2018).

2.7.1 Pacotes do software R

O pacote *devtools* transforma as funções em linguagem R em pacotes, o mesmo cria dependência que simplificam a criação de pacote. O desenvolvimento de pacotes facilita a distribuição das funções para o usuário (WICKHAM; HESTER; CHANGE, 2018). O R

possui um repositório oficial de pacote, denominado CRAN, que é uma rede de servidor em que armazena versões e atualizações dos códigos (CRAN, 2018).

Outra forma de disponibilizar pacotes é no repositório GitHub, que é um serviço de hospedagem que permite o controle de versão usando o Git. O servidor disponibiliza repositórios público, ou privado, para hospedar projetos de softwares de código aberto (GITHUB, 2018).

Silva, Itako e Tolentino Júnior (2017) propuseram um script desenvolvido na linguagem R para a quantificação de fungos fitopatológicos agrícola em placas de Petri. O script possibilita a quantificação do fungo por meio de imagens digitais, utilizando o pacote *EBImage* para isolar a colônia e uma área conhecida, e está a área conhecida é utilizado como escala para a quantificação. O script reduz o tempo de análise da imagem e aumenta a precisão, por ter uma técnica padrão, destacando o caso em que as colônias não são uniformes.

Guo, Westra e Peterson (2017), desenvolveram um pacote na linguagem R denominado de *Evapotranspiration*, que tem como finalidade calcular por diferentes formas a evapotranspiração e a evapotranspiração real, incluindo o método de Penman Monteith FAO 56.

Moeys et al. (2018) desenvolveu o *soiltexture* que é um pacote na linguagem R, com um conjunto de funções para produzir o triângulo de textura, a assim classificar e transformam dados de textura de solo.

Silva e Tolentino Júnior. (2016a) desenvolveram o pacote *HF* em linguagem R, disponível na plataforma Github. O pacote propõe a resolução dos cálculos hidráulicos de perda de carga, vazão e diâmetro, em que o usuário pode escolher a equação que será aplicada, tendo na biblioteca a resolução por: Colebrook-White, Swamee-Jain, Hazen-Williams ou Flamant.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para determinar o perfil de pressão e vazão no sistema de irrigação por gotejamento foram utilizadas as Equações Básicas da Hidráulica: Equação da Continuidade (Equação 1), Equação de Bernoulli (Equação 2), Equação da Perda de Carga (Equação 4) e Equação de Colebrook-White (Equação 7) resolvida pelo método de Newton – Rapson.

$$Q = A \cdot V \quad (1)$$

$$\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + Z_2 + Hf_{1 \rightarrow 2} \quad (2)$$

$$Hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

3.1 PERDA DE CARGA

Foi desenvolvida uma função denominada hf para quantificar a perda de carga. Com o número de Reynolds (equação 5) foi determinado o regime de escoamento, laminar ($Re < 2000$) ou turbulento ($Re > 4000$).

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (5)$$

Neste contexto, foi inserida uma condição, quando o regime é classificado em laminar, o coeficiente de atrito foi calculado pela Equação 6.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (6)$$

Se o número de Reynolds é maior que 4000, o coeficiente de atrito foi calculado por meio da Equação 7, resolvida iterativamente pelo método de Newton – Raphson. A equação tem apenas uma solução.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (7)$$

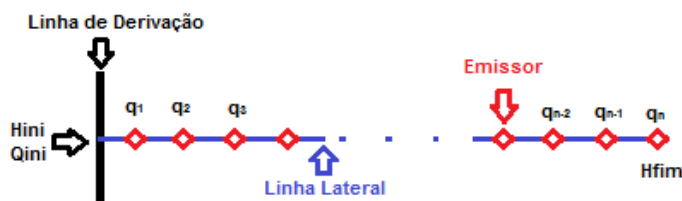
Após definir o fator de atrito, calculou-se a perda de carga pela equação de Darcy–Weisbach (Equação 7).

$$Hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (4)$$

3.2 BACKSTEP

Para determinar o perfil de pressão e vazão na linha lateral de irrigação foi utilizado o método *backstep*. Por meio desse método, a pressão no final da linha lateral (H_{fim}) foi inicialmente estabelecida. Por meio do valor atribuído a pressão no final da linha lateral e das características do emissor foi calculada a vazão e pressão em cada emissor, e a perda de carga em cada elemento entre dois emissores. Também foi possível determinar a vazão e pressão no início da linha lateral (Figura 3).

Figura 3 - Dimensionamento da linha lateral pelo método backstep.



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Para o último emissor (n-ésimo emissor), a pressão foi determinada previamente (Equação 12). A vazão do último emissor foi calculada por meio das característica do emissor aplicando os coeficientes K e x (Equação 13). À vazão do último elemento (imaginário) da linha lateral se atribuiu o valor zero (sem fluxo) (Equação 14).

$$H_n = H_{fim} \quad (12)$$

$$q_n = K \cdot H_n^x \quad (13)$$

$$Q_n = 0 \quad (14)$$

Em que:

H_n – pressão no n-ésimo emissor, mca;

H_{fim} – pressão no último emissor, mca;

q_n – vazão dos emissores, $m^3 \cdot s^{-1}$;

K – coeficiente de emissão, adimensional;

x – expoente de emissão, adimensional;

Q_n – vazão no último elemento da linha, $m^3 \cdot s^{-1}$.

A vazão na linha lateral (Q_{i-1}) foi calculada pela soma da vazão do elemento posterior mais a vazão do emissor anterior (Equação 15). A pressão na linha lateral (H_{i-1}) foi calculada por meio da soma da pressão no emissor posterior e a perda de carga no elemento anterior da linha lateral (Equação 16). A vazão do emissor (q_{i-1}) foi calculada pelas características do emissor (K e x) e pela pressão no emissor (Equação 17). As equações foram implementadas em linguagem R, dentro de um loop do tipo *for*, onde o elemento “i”, número de iterações é definido pelo número de emissores que compõe a linha lateral.

$$Q_{i-1} = Q_i + q_i \quad (15)$$

$$H_{i-1} = H_i + hf(Q_{i-1}) \quad (16)$$

$$q_{i-1} = K \cdot H_{i-1}^x \quad (17)$$

Em que:

Q_{i-1} – vazão no elemento i-1 da linha lateral, $m^3 \cdot s^{-1}$;

Q_i – vazão no elemento i da linha lateral, $m^3 \cdot s^{-1}$;

q_i – vazão no emissor i, $m^3 \cdot s^{-1}$;

q_{i-1} – vazão no emissor i-1, $m^3 \cdot s^{-1}$;

H_{i-1} – pressão no emissor $i-1$, mca;

H_i – pressão no emissor i , mca;

$hf_{(Q_{n-1})}$ – perda de carga no elemento $i-1$ da linha lateral em função da vazão Q_{i-1} , m.

A vazão no início da linha lateral foi calculada por meio da vazão da linha lateral e a vazão do primeiro elemento (Equação 18), sendo que, esses valores são obtidos para o primeiro elemento (Q_1 e q_1) por meio das Equações 15 e 17.

$$Q_{ini} = Q_1 + q_1 \quad (18)$$

Em que:

Q_{ini} – vazão no início da linha lateral, $m^3 \cdot s^{-1}$;

Q_1 – vazão no primeiro elemento da linha lateral, $m^3 \cdot s^{-1}$;

q_1 – vazão no primeiro emissor, $m^3 \cdot s^{-1}$.

A pressão no início da linha lateral foi calculada pela Equação 19, definida pela soma dos parâmetros pressão e perda de carga no primeiro elemento ou emissor da linha lateral, Equações 15 e 16.

$$H_{ini} = H_1 + hf_1 \quad (19)$$

Em que:

H_{ini} – pressão no início da linha lateral, mca;

H_1 – pressão no primeiro emissor, mca;

hf_1 – perda de carga no início da linha lateral, m.

3.3 SUBUNIDADE

A subunidade de irrigação pode ser representada por uma matriz bidimensional, em que as linhas laterais (LL) estão representadas na matriz por linhas (j) e os emissores (E) que são representados por colunas (i).

Figura 4 - Matriz de um sistema de irrigação representada pelas linhas laterais e emissores.

$$\begin{bmatrix} LL1E1 & LL1E2 & LL1E3 & LLjEi \\ LL2E1 & LL2E2 & LL2E3 & LLjEi \\ LL3E1 & LL3E2 & LL3E3 & LLjEi \\ LLjEi & LLjEi & LLjEi & LLjEi \end{bmatrix}$$

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

A subunidade de um sistema de irrigação é composta pela linha lateral e a linha de derivação. A linha de derivação pode ser comparada com uma linha lateral para realizar o dimensionamento. Foi desenvolvida a função *coefic* para determinar os coeficientes da linha lateral.

Silva e Tolentino Júnior (2016b) descreveram a relação entre pressão e vazão no início da linha lateral por uma Equação Potência, e a relação entre pressão inicial e pressão no final da linha lateral por uma Equação Linear.

A Equação Potência foi linearizada por logaritmo (Equações 20 e 21) para determinar os coeficientes *a* e *b*.

$$Q_{ini} = K \cdot H_{ini}^b \quad (20)$$

$$\log Q_{ini} = \log a + b \cdot \log H_{ini} \quad (21)$$

A equação linear (Equação 22) foi utilizada para determinar o coeficiente *c*, que é descrita pela relação:

$$H_{Ini} = c \cdot H_{fim} \quad (22)$$

Posteriormente, foi calculada a pressão inicial de cada linha lateral com a função *LD*. O dimensionamento da subunidade foi colocado dentro de um *loop*, em que a iteração é o número de linhas laterais.

3.4 ESTABELEECER A LINHA LATERAL

Com a finalidade de propor um melhor dimensionamento para a linha lateral se utilizou o método da bisseção para determinar o diâmetro e a pressão.

Com o objetivo de determinar o diâmetro da linha lateral, foi desenvolvida a função lld utilizando a função ll , para atender ao critério da variação de vazão do emissor menor ou igual a 10 %. Para determinar o diâmetro usou-se a função descrita na Equação 23.

$$f(D) = \Delta q - \left(\frac{\max_q - \min_q}{\max_q} \cdot 100 \right) \quad (23)$$

Em que:

Δq – Variação de vazão, %;

\max_q – Máxima vazão, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

\min_q – Mínima vazão, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

A definição da pressão foi em função de uma determinada vazão média requerida. Atribuiu-se o valor de $3,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para a vazão média dos emissores para gotejamento, que corresponde a uma vazão de 12 L/h. Neste contexto, se desenvolveu a função llh .

A função utilizada para determinar a pressão é descrita pela Equação 24.

$$f(H_{fim}) = (qr - \text{mean}_q) \quad (24)$$

Em que:

qr – vazão requerida;

mean_q – média da vazão do emissor, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Para aprimorar o dimensionamento da linha lateral foi elaborado a função $lldh$, que faz o dimensionamento do diâmetro da linha lateral e da pressão no final da linha lateral, utilizando as Equações 23 e 24, simultaneamente.

3.5 ESTABELECEER UMA SUBUNIDADE

A metodologia para definir a subunidade foi semelhante à da linha lateral. Conquanto, utilizou-se a função da *subuni*.

Foi elaborada a função *subunid* com o intuito de determinar o diâmetro da linha de derivação para uma subunidade com a variação máxima de 10% entre a vazão máxima e mínima dos emissores, conforme a Equação 23.

O algoritmo *subunih* foi desenvolvido para determinar a pressão no final da linha de derivação, para uma vazão requerida, conforme a função da pressão no final da linha descrita pela equação 24.

Com objetivo de aperfeiçoar as funções *subunid* e *subunih*, foram agrupadas em uma função *subunidh*, em que determinou-se a pressão no final da linha de derivação e o diâmetro da linha de derivação simultaneamente.

3.6 PACOTE HydIrrig

Com auxílio do pacote Devtools, foram criados os arquivos necessário para o desenvolvimnto do pacote HydIrrig. Os algoritmos foram dispostos em funções já com o intuito de serem implementadas como um pacote no R. Está disponível <https://github.com/FernandaFOS/HydIrrig>.

4 RESULTADOS

4.1 PERDA DE CARGA

O código da função hf está no Apêndice A. Para exemplificar a aplicação da função foi proposto um estudo de caso para o regime turbulento, que é o regime mais comum em um sistema de gotejamento. Os parâmetros utilizados para o estudo de caso foram:

- Diâmetro (D): 0,025 m;
- Vazão (Q): 0,001 m³.s⁻¹;
- Comprimento (L): 100 m.

Neste estudo de caso o tempo de execução foi insignificante. A função retorna os parâmetros tipo de regime, que foi o turbulento e a perda de carga (hf) de 25,78 m e o número de iterações resolvidas por Newton-Raphson que foi de 4 para determinar a perda de carga, conforme Quadro 1.

Quadro 1- Resultado da função hf para um regime turbulento.

```
> hf(D = 0.025, Q = 0.001, L = 100)
$regime
[1] "regime turbulento"
$hf
[1] 25.77938
$iteração
[1] 4
$tempo
elapsed
0
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Porém no final da linha lateral, em determinadas situações, pode ocorrer o regime laminar devido a vazão ser mínima. Foi proposto um estudo de caso para o regime laminar, foram utilizados os parâmetros:

- Diâmetro (D): 0,080 m;
- Vazão (Q): 0,0001 m³.s⁻¹;
- Comprimento (L): 500 m.

Assim como o estudo de caso do regime turbulento, o tempo de execução para determinar o regime laminar e a perda de carga no sistema que foi de 0,005 o tempo de

processamento foi menor que zero segundo, conforme Quadro 2. Pode-se atribuir esse tempo de execução por se priorizar um código limpo, que possibilite fáceis alterações se necessário ou utilização em outros cálculos.

Quadro 2 - Função *hf* regime laminar.

```
> hf(D = 0.080, Q = 0.0001, L = 500)
$regime
[1] "regime laminar"
$hf
[1] 0.00512062
$iteração
[1] 0
$tempo
elapsed
0
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

4.2 LINHA LATERAL

Empregando a função *ll*, disponível no Apêndice C, foram calculadas as variáveis em cada seção, retornando os valores: pressão inicial para uma única linha lateral (H_{ini}), vazão inicial na linha lateral (Q_{ini}), pressão em cada emissor (H), vazão em cada emissor (q), vazão do sistema (Q), perda de carga (H_f) e tempo de execução. A função calcula tanto para situações sem declive como para aclive ou declive. Realizaram-se três estudos de caso, nos quais variou-se a declividade em que a linha lateral se encontrava. Os parâmetros empregados foram:

- Pressão no final da linha lateral (H_{fim}): 10 mca;
- Coeficiente do emissor (K): $1,053 \cdot 10^{-6}$;
- Expoente do emissor (x): 0,5;
- Diâmetro da linha lateral (D): 0,025 m;
- Espaçamento entre os emissores (Se): 1 m;
- Número de emissores (ne): 10 unidades;
- Declividade: 0%; 1% e -1%.

Analisando o dimensionamento da linha lateral em declividade zero, aclive e declive de 1%, as pressões no início da linha lateral se mantiveram muito próximas. Sem declive se manteve em 10,00 mca. Para aclive de 1%, o resultado foi 10,10 mca. Para declive de 1% se

obteve a pressão no início da linha lateral de 9,90 mca, e a maior pressão ficou no último emissor (Quadros 3, 4 e 5).

Quadro 3 - Dimensionamento da linha lateral sem declividade.

```
>ll( Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 10, dec =
0.00)
$Hini
[1] 10.00197
$Qini
[1] 3.329977e-05
$H
[1] 10.00161 10.00129 10.00100 10.00075 10.00054 10.00036
[7] 10.00021 10.00011 10.00004 10.00000
$q
[1] 3.330146e-06 3.330093e-06 3.330045e-06 3.330003e-06
[5] 3.329968e-06 3.329938e-06 3.329914e-06 3.329896e-06
[9] 3.329884e-06 3.329878e-06
$Q
[1] 3.329977e-05 2.996962e-05 2.663953e-05 2.330948e-05
[5] 1.997948e-05 1.664951e-05 1.331957e-05 9.989659e-06
[9] 6.659763e-06 3.329878e-06
$Hf
[1] 3.575968e-04 3.218353e-04 2.860744e-04 2.503139e-04 2.145540e-04
[6] 1.787944e-04 1.430351e-04 1.072761e-04 7.151731e-05 3.575862e-05
$`q médio`
[1] 3.329977e-06
$tempo
elapsed
0
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 4 - Dimensionamento da linha lateral em aclave.

```
> ll( Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 10, dec = 0.01 )
$Hini
[1] 10.10197
$Qini
[1] 3.337457e-05
$H
[1] 10.09161 10.08129 10.07100 10.06075 10.05054 10.04036 10.03021
[8] 10.02011 10.01004 10.00000
$q
[1] 3.345096e-06 3.343385e-06 3.341679e-06 3.339978e-06 3.338282e-06
[6] 3.336591e-06 3.334905e-06 3.333224e-06 3.331549e-06 3.329878e-06
$Q
[1] 3.337457e-05 3.002947e-05 2.668609e-05 2.334441e-05 2.000443e-05
[6] 1.666615e-05 1.332956e-05 9.994652e-06 6.661427e-06 3.329878e-06
$Hf
[1] 3.584001e-04 3.224780e-04 2.865743e-04 2.506890e-04 2.148219e-04
[6] 1.789731e-04 1.431423e-04 1.073297e-04 7.153519e-05 3.575862e-05
$`q médio`
[1] 3.337457e-06
$tempo
elapsed
0
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

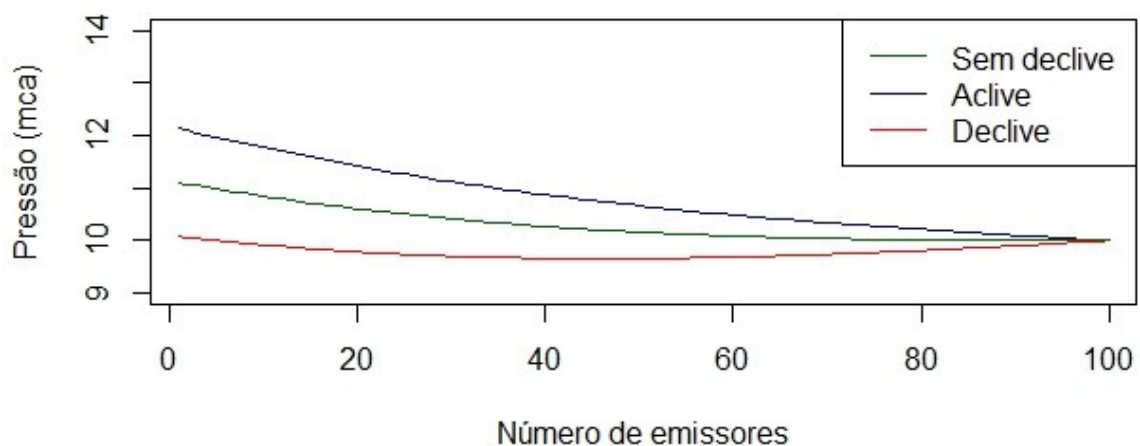
Quadro 5 - Dimensionamento da linha lateral em declive.

```
> ll( Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 10, dec =
-0.01)
$Hini
[1] 9.901964
$Qini
[1] 3.322473e-05
$H
  [1]  9.911607  9.921286  9.931000  9.940750  9.950536  9.960357
  [7]  9.970214  9.980107  9.990036 10.000000
$q
  [1] 3.315129e-06 3.316747e-06 3.318370e-06 3.319999e-06 3.321633e-06
  [6] 3.323272e-06 3.324916e-06 3.326565e-06 3.328219e-06 3.329878e-06
$Q
  [1] 3.322473e-05 2.990960e-05 2.659285e-05 2.327448e-05 1.995448e-05
  [6] 1.663285e-05 1.330958e-05 9.984662e-06 6.658097e-06 3.329878e-06
$Hf
  [1] 3.567910e-04 3.211907e-04 2.855731e-04 2.499381e-04 2.142855e-04
  [6] 1.786155e-04 1.429278e-04 1.072225e-04 7.149943e-05 3.575862e-05
$q médio
[1] 3.322473e-06
$tempo
elapsed
  0
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

No estudo de caso utilizando os mesmos parâmetros, diferindo apenas o número de emissores para 100 unidades. Constatou-se que para a situação sem declividade e com alicive de 1% que a máxima pressão ficou localizada no início da linha lateral e a pressão mínima no final da linha lateral. O perfil com declividade mostrou comportamento diferente (Figura 5).

Figura 5 - Perfil de pressão nas situações de sem declive, com alicive e declive.



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

O objetivo desse estudo de caso foi representar o perfil de pressões em uma única linha lateral, em que cada valor representa a pressão de um único emissor (Quadros 6, 7 e 8). No exemplo com declividade, verificou-se que a máxima pressão ocorreu no início da linha lateral e a mínima no emissor 46 (Quadro 6).

Quadro 6 - Perfil de pressões com declive de 1%.

```
> ll( Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 100, dec
= -0.01)

$H
[1] 10.083466 10.063031 10.043175 10.023894 10.005182 9.987031
[7] 9.969438 9.952395 9.935896 9.919937 9.904511 9.889612
[13] 9.875236 9.861375 9.848024 9.835178 9.822830 9.810976
[19] 9.799610 9.788726 9.778318 9.768382 9.758910 9.749899
[25] 9.741342 9.733234 9.725569 9.718342 9.711548 9.705181
[31] 9.699235 9.693706 9.688587 9.683874 9.679561 9.675643
[37] 9.672114 9.668969 9.666203 9.663810 9.661784 9.660122
[43] 9.658817 9.657863 9.657257 9.656991 9.657062 9.657464
[49] 9.658190 9.659237 9.660599 9.662270 9.664245 9.666519
[55] 9.669087 9.671942 9.675081 9.678497 9.682185 9.686140
[61] 9.690356 9.694828 9.699552 9.704520 9.709728 9.715171
[67] 9.720843 9.726738 9.732852 9.739178 9.745712 9.752447
[73] 9.759379 9.766501 9.773809 9.781295 9.788956 9.796785
[79] 9.804777 9.812925 9.821224 9.829669 9.838253 9.846971
[85] 9.855817 9.864784 9.873867 9.883060 9.892356 9.901964
[91] 9.911607 9.921286 9.931000 9.940750 9.950536 9.960357
[97] 9.970214 9.980107 9.990036 10.000000
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 7 - Perfil de pressões na linha lateral sem declive.

```
> ll( Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 100, dec
= 0.00)

$H
[1] 11.11054 11.07866 11.04741 11.01677 10.98675 10.95732 10.92849
[8] 10.90025 10.87259 10.84551 10.81900 10.79304 10.76765 10.74280
[15] 10.71850 10.69473 10.67150 10.64879 10.62659 10.60491 10.58373
[22] 10.56305 10.54286 10.52316 10.50394 10.48520 10.46692 10.44910
[29] 10.43174 10.41483 10.39836 10.38233 10.36673 10.35156 10.33681
[36] 10.32247 10.30853 10.29501 10.28187 10.26913 10.25677 10.24479
[43] 10.23318 10.22194 10.21106 10.20054 10.19036 10.18053 10.17104
[50] 10.16187 10.15304 10.14452 10.13632 10.12843 10.12085 10.11356
[57] 10.10656 10.09985 10.09342 10.08726 10.08137 10.07575 10.07038
[64] 10.06527 10.06040 10.05577 10.05138 10.04721 10.04327 10.03955
[71] 10.03604 10.03273 10.02963 10.02672 10.02399 10.02145 10.01909
[78] 10.01690 10.01487 10.01300 10.01129 10.00972 10.00829 10.00700
[85] 10.00584 10.00480 10.00388 10.00307 10.00236 10.00197 10.00161
[92] 10.00129 10.00100 10.00075 10.00054 10.00036 10.00021 10.00011
[99] 10.00004 10.00000
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 8 - Perfil de pressões para aclave 1%.

```
> ll( Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 100, dec
= 0.01)

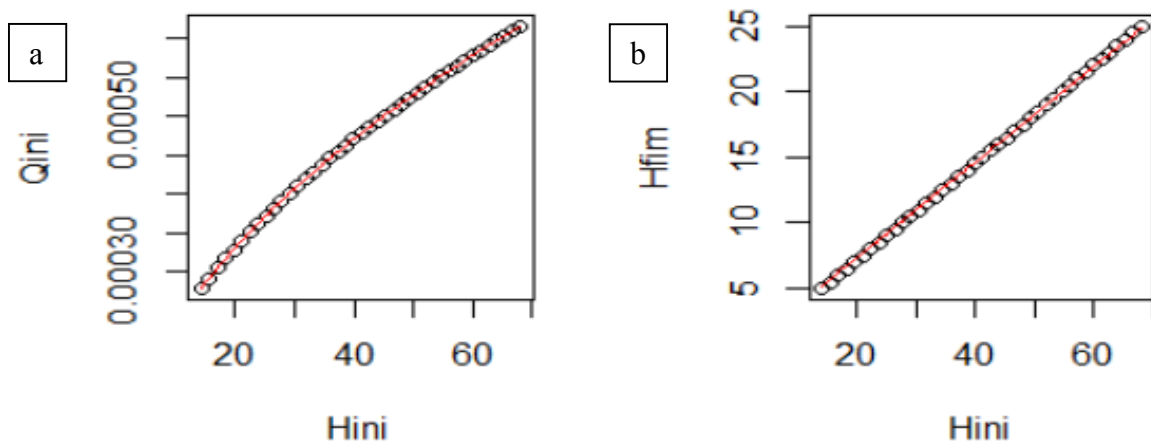
$H
 [1] 12.13730 12.09400 12.05136 12.00939 11.96806 11.92737 11.88731
 [8] 11.84789 11.80908 11.77088 11.73329 11.69630 11.65989 11.62407
[15] 11.58883 11.55415 11.52003 11.48647 11.45345 11.42098 11.38903
[22] 11.35762 11.32672 11.29634 11.26646 11.23708 11.20819 11.17979
[29] 11.15186 11.12441 11.09743 11.07090 11.04483 11.01920 10.99401
[36] 10.96925 10.94492 10.92101 10.89751 10.87442 10.85173 10.82943
[43] 10.80752 10.78600 10.76485 10.74406 10.72364 10.70358 10.68387
[50] 10.66450 10.64547 10.62677 10.60839 10.59034 10.57260 10.55516
[57] 10.53803 10.52119 10.50464 10.48838 10.47238 10.45667 10.44121
[64] 10.42601 10.41107 10.39637 10.38191 10.36769 10.35369 10.33992
[71] 10.32636 10.31302 10.29987 10.28693 10.27418 10.26161 10.24922
[78] 10.23701 10.22496 10.21308 10.20135 10.18977 10.17833 10.16703
[85] 10.15586 10.14482 10.13389 10.12307 10.11236 10.10197 10.09161
[92] 10.08129 10.07100 10.06075 10.05054 10.04036 10.03021 10.02011
[99] 10.01004 10.00000
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

4.3 LINHA DE DERIVAÇÃO

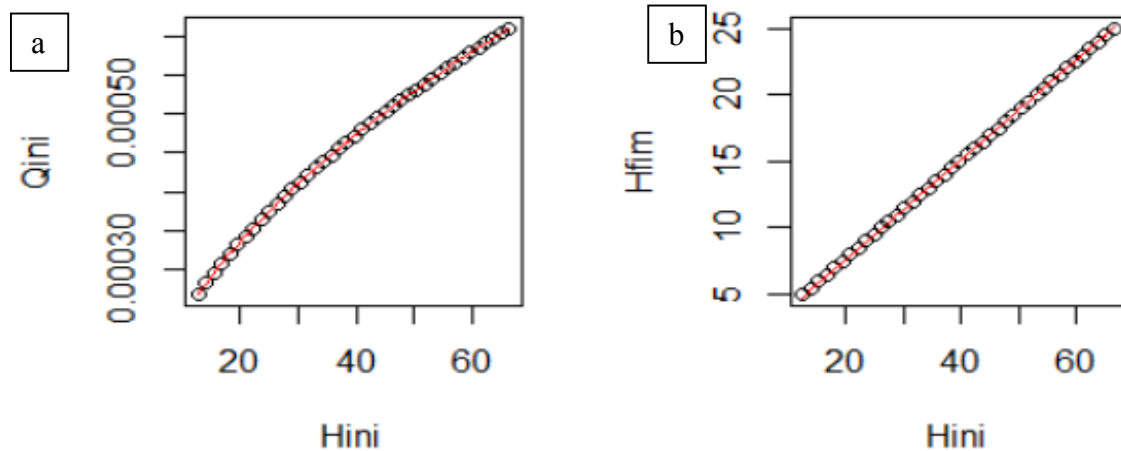
O dimensionamento da linha de derivação foi realizado como de uma linha lateral, calculando-se os coeficientes da linha lateral. Os coeficientes foram calculados por meio de simulação, em que a relação pressão inicial e vazão inicial foi descrito por uma Equação Potência e pressão inicial e vazão final por uma Equação Linear (Figuras 6 e 7). O algoritmo encontra-se no Apêndice B.

Figura 6 - a) Equação Potência (sem declividade). b) Equação Linear (sem declividade).



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Figura 7 - a) Relação pressão inicial e vazão inicial em declive de 1%. b) Relação pressão inicial e pressão final com declive de 1%.



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Para cada dimensionamento de linha lateral se torna necessário calcular os coeficientes da linha lateral. Visto que o diâmetro, espaçamento entre emissores e números de emissores afeta esses coeficientes, foi simulado um estudo de caso, com os seguintes parâmetros:

- Coeficiente do emissor (K): $1,053 \cdot 10^{-6}$;
- Coeficiente do emissor (x): 0,5;
- Diâmetro da linha lateral (D): 0,015 m;
- Espaçamento entre os emissores (Se): 1 m;
- Número de emissores (ne): 10 unidades;
- Pressão no final da linha de derivação (HL): 15 mca;
- Declividade (dec): 0% e 1%.

A função se apresentou eficiente para calcular os coeficientes seja em uma situação sem declividade ou com declividade. A resolução da função apresentou os coeficientes a , b e c , gráfico com a linha de tendência em vermelho (Figuras 6 e 7) e o tempo de resolução (Quadros 9 e 10). Verificam-se os valores dos coeficientes muito próximos, mesmo sendo situações diferentes. O coeficiente b sempre estará próximo ao valor teórico 0,5, sendo que nos exemplos se obteve valores para a situação sem declive de 0,508, e 0,515 para situações com declive de 1%. O coeficiente a e c foi de $7,223 \cdot 10^{-5}$ e 0,365 para a situação sem declive e para o estudo de caso em declive foi de $6,991 \cdot 10^{-5}$ e 0,353. Esses coeficientes são utilizados para o dimensionamento da linha de derivação, uma vez que a linha de derivação pode se

assemelhar a linha lateral, entretanto, o fabricante não fornece esses coeficientes, sendo necessários determina-los.

Quadro 9 - Coeficientes da Linha Lateral sem declive.

```
> coefic( K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.015, Se = 1, ne = 100, dec = 0.00,
HL = 15)
$a
[1] 7.223525e-05
$b
[1] 0.5081218
$c
[1] 0.3651068
$tempo
elapsed
0.16
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 10 - Coeficientes da Linha Lateral com declive.

```
> coefic( K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.015, Se = 1, ne = 100, dec = 0.01,
HL = 15)
$a
[1] 6.991466e-05
$b
[1] 0.5152047
$c
[1] 0.3533653
$tempo
elapsed
0.21
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

4.4 SUBUNIDADE

Com o intuito de conhecer detalhadamente o perfil da subunidade foi proposto um estudo de caso usando a função *subuni*, a qual tem como finalidade determinar a pressão e vazão em cada emissor em uma subunidade de gotejamento. O estudo de caso levou em consideração os seguintes parâmetros:

- Pressão no fim da linha de derivação (H_{fimLD}): 15 mca;
- Coeficiente do emissor K (K): $1,053 \cdot 10^{-6}$;
- Coeficiente do emissor x (x): 0,5;
- Diâmetro linha lateral (DLL): 0,025 m;
- Diâmetro da linha de derivação (DLD): 0,040 m;
- Espaçamento entre linhas laterais (SeLD): 1m;
- Espaçamento entre os emissores (SeLL): 4 m;

- Número linha lateral (nLL): 10 unidades;
- Número de emissores (ne): 100 unidades;
- Declividade (dec): 0%.

A função *subuni* (Quadro 11), resulta em duas matrizes, uma representando a vazão em cada emissor (q) e outra representando a pressão em cada emissor da linha lateral (h) (Quadro 12). Foi atribuído o valor de pressão no final na linha de derivação de 15 mca, que foi dimensionada conforme uma linha lateral utilizando os dos coeficientes *a*, *b* e *c*. Sendo assim, determinou-se por meio da função a pressão no final da linha de derivação de 14,984 mca. A função está disponível no Apêndice G.

Quadro 11 - Parâmetros da função *subuni*.

```
> subuni( HfimLD = 15,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  DLL = 0.025,
  DLD = 0.040,
  SeLD = 4,
  SeLL = 1,
  nLL = 10,
  ne = 100,
  dec = 0.0)
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 12 - Dimensionamento da subunidade.

```
$q
      [,1]      [,2]      [,3]      [,4]      [,5]
[1,] 4.202743e-06 4.167640e-06 4.139669e-06 4.118032e-06 4.101949e-06
[2,] 4.196831e-06 4.161771e-06 4.133836e-06 4.112227e-06 4.096164e-06
[3,] 4.191026e-06 4.156010e-06 4.128109e-06 4.106527e-06 4.090484e-06
[4,] 4.185329e-06 4.150355e-06 4.122488e-06 4.100932e-06 4.084909e-06
[5,] 4.179738e-06 4.144806e-06 4.116972e-06 4.095442e-06 4.079437e-06
[6,] 4.174253e-06 4.139362e-06 4.111560e-06 4.090055e-06 4.074069e-06
[7,] 4.168873e-06 4.134021e-06 4.106252e-06 4.084771e-06 4.068804e-06
[8,] 4.163596e-06 4.128784e-06 4.101045e-06 4.079589e-06 ...

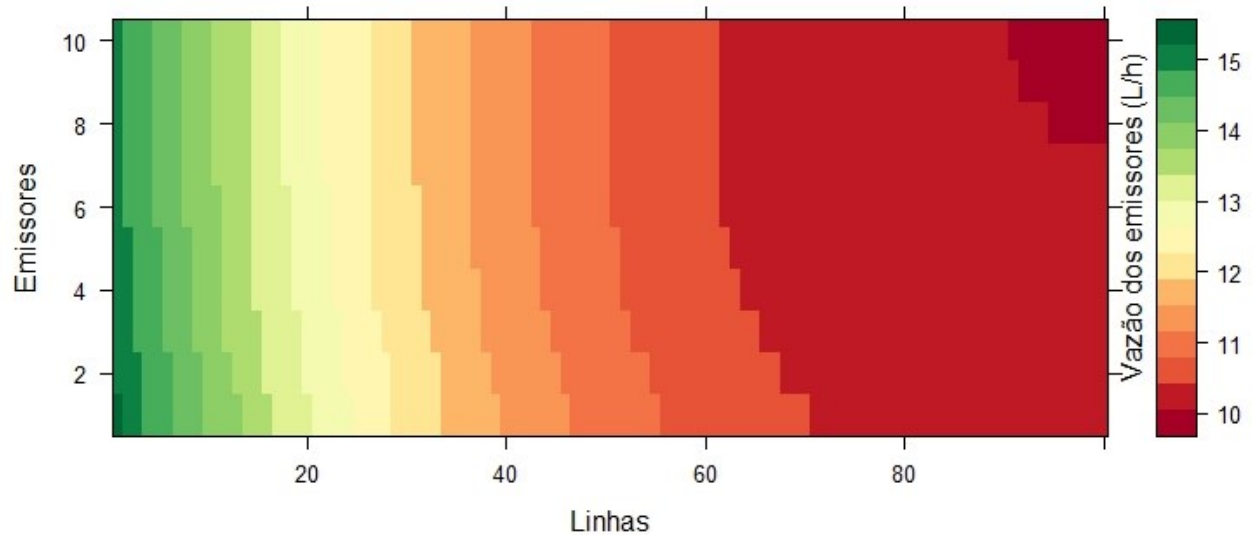
$h
      [,1]      [,2]      [,3]      [,4]      [,5]      ...      [,10]
[1,] 15.92975 15.66475 15.45519 15.29406 15.17483 ...      14.98644
[2,] 15.88496 15.62067 15.41167 15.25097 15.13205 ...      14.94417
[3,] 15.84105 15.57745 15.36900 15.20872 15.09012 ...      14.90272
[4,] 15.79801 15.53509 15.32717 15.16730 15.04901 ...      14.86210
[5,] 15.75584 15.49358 15.28619 15.12672 15.00872 ...      14.82229
[6,] 15.71451 15.45290 15.24602 15.08695 14.96925 ...      14.78328
[7,] 15.67402 15.41305 15.20668 15.04800 14.93058 ...      14.74506
[8,] 15.63437 15.37402 15.16814 15.00984 14.89271 ...      14.70763
[9,] 15.59554 15.33580 15.13041 14.97247 14.85561 ...      ...

$tempo
elapsed
1.02
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

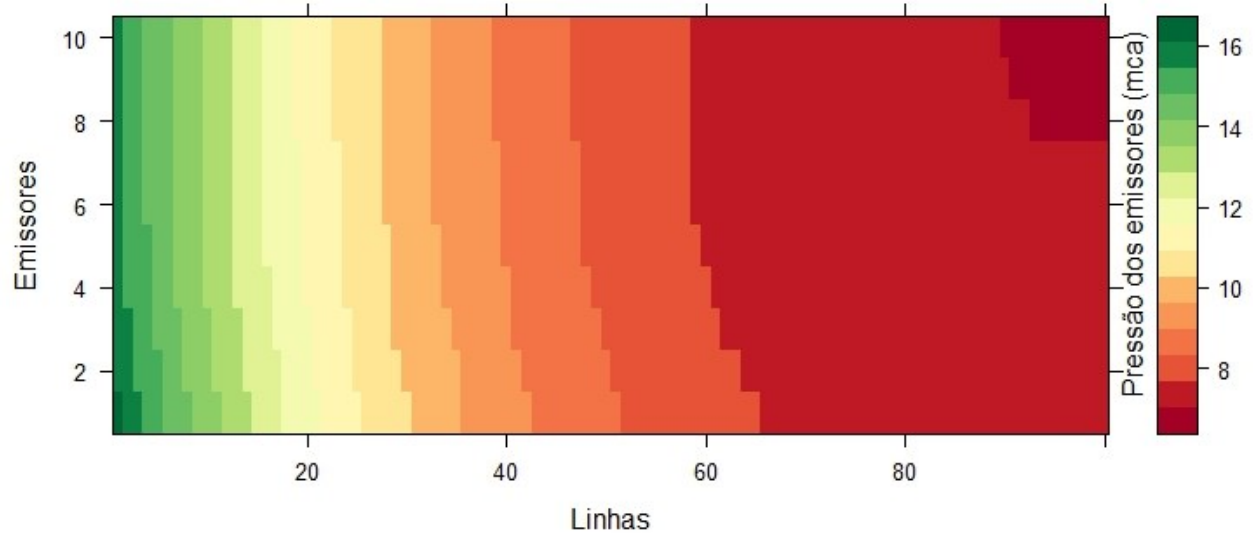
A matriz bidimensional da pressão e vazão foi utilizada para a elaboração de um gráfico isolinhas para representar a dinâmica da pressão para o caso sem declividade em que as maiores pressões se encontram no início da linha de derivação e na primeira linha lateral, seguindo a mesma disposição para a pressão em uma subunidade (Figuras 8 e 9).

Figura 8 - Variação da vazão na subunidade.



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Figura 9 - Variação da pressão na subunidade.



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

4.5 ESTABELECE A LINHA LATERAL

As equações do backstep possibilitam o usuário conhecer a uniformidade do sistema antecipadamente, visto que a análise adequada da hidráulica é uma preocupação muito importante para o projeto, sendo que o diâmetro inadequado pode representar um custo a mais no projeto. O diâmetro pode influenciar na dinâmica da variação da vazão, quando se conhece os parâmetros como espaçamento dos emissores, número de emissores e a pressão no final da linha. Neste contexto, se torna de suma importância ainda em fase de projeto escolher um diâmetro que resulte em uma baixa variação da vazão.

Foram propostas diferentes situações para as funções, em que a principal finalidade é ajustar o sistema de uma forma rápida e prática. O algoritmo desenvolvido se está disponível no Apêndice D. Nos estudos de casos foram utilizados os parâmetros:

- Pressão no final da linha lateral: 10 mca;
- Coeficiente do emissor (K): $1,053 \cdot 10^{-6}$;
- Coeficiente do emissor (x): 0,5;
- Espaçamento entre os emissores (Se): 1 m;
- Número de emissores (ne): 100 unidades;
- Variação da vazão dos emissores (qvr): 10 %;
- Vazão requerida dos emissores ($qreq$): $3,333 \cdot 10^{-6}$;
- Declividade (dec): 0, 1 e -1%.

A função *lld* possibilitou determinar um diâmetro da linha lateral que resulte em uma variação de vazão de no máximo 10% (Equação 23), o tempo de execução foi de 0,11 segundos. Como resultado apresenta o diâmetro da linha lateral (D), variação da vazão na linha lateral (qv), número de iterações resolvida pelo método da bissecção e o tempo de processamento em segundos. Sendo assim, possibilita o usuário variar a pressão final e definir o diâmetro da linha lateral em fase de projeto que atenda a uniformidade de aplicação da água. Levando em conta a variação da declividade, se obteve os diâmetros internos: 0,021, 0,024 e 0,020 m (Quadros 13, 14 e 15) respectivamente.

$$f(D) = \Delta q - \left(\frac{max_q - min_q}{max_q} \cdot 100 \right) \quad (23)$$

Quadro 13 - Estabelecer variação da vazão pela alteração do diâmetro (sem declividade).

```
> lld(
  Hfim = 10,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  Se = 1,
  ne = 100,
  dec = 0.0,
  qvr = 10,
  imax = 100,
  toler = 1e-6,
  DLLa = 1,
  DLLb = 0
)

$D
[1] 0.02159837
$qv
[1] 10
$iter
[1] 30
$tempo
elapsed
  0.11
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 14 - Estabelecer a variação da vazão pela alteração do diâmetro (com aclive).

```
> lld(
  Hfim = 10,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  Se = 1,
  ne = 100,
  dec = 0.01,
  qvr = 10,
  imax = 100,
  toler = 1e-6,
  DLLa = 1,
  DLLb = 0
)

$D
[1] 0.02419033
$qv
[1] 10
$iter
[1] 28
$tempo
elapsed
  0.11
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 15 - Estabelecer a variação da vazão pela alteração do diâmetro (com declive).

```
> lld(
  Hfim = 10,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  Se = 1,
  ne = 100,
  dec = -0.01,
  qvr = 10,
  imax = 100,
  toler = 1e-6,
  DLLa = 1,
  DLLb = 0)
$D
[1] 0.02034233
$qv
[1] 10
$iter
[1] 29
$tempo
elapsed
  0.11
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Com o método da bisseção, também foi possível determinar uma pressão no final da linha lateral para atender uma vazão média dos emissores requerida pelo usuário. No exemplo, utilizou-se a vazão de $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, que é uma vazão comum em sistema de gotejamento (Quadro 16). O algoritmo da função *llh* está disponível no Apêndice E.

Quadro 16 - Estabelecer a vazão requerida no emissor pela alteração da pressão no final da linha lateral.

```
> llh(
  D = 0.045,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  Se = 1,
  ne = 100,
  dec = 0.00,
  qreq = 3.333333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-10,
  Hfima = 30,
  Hfimb = 0
)
$Hfim
[1] 10.00488
$qssystema
[1] 3.333417e-06
$iter
[1] 11
$tempo
elapsed
  0.05
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Para demonstrar como o declive ou aclave influencia na pressão inicial, foi realizado uma comparação com as pressões no início da linha lateral, considerando uma declividade de $\pm 4\%$ (Quadros 17 e 18). Na situação de aclave, se obteve uma pressão de 7,83 mca, enquanto que em declive apresentou uma pressão de 11,71 mca para que a vazão dos emissores atingisse a vazão determinada pelo usuário.

Quadro 17 - Função *llh* com aclave de 4%.

```
> llh(
  D = 0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  Se = 1,
  ne = 100,
  dec = 0.04,
  qreq = 3.333333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-10,
  Hfima = 30,
  Hfimb = 0)
$Hfim
[1] 7.826843
$qsisistema
[1] 3.333327e-06
$iter
[1] 15
$tempo
elapsed
0.06
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 18 - Função *llh* em declive de 4%.

```
> llh(
  D = 0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  Se = 1,
  ne = 100,
  dec = -0.04,
  qreq = 3.333333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-10,
  Hfima = 30,
  Hfimb = 0)
$Hfim
[1] 11.71143
$qsisistema
[1] 3.333277e-06
$iter
[1] 12
$tempo
elapsed
0.04
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Com o propósito de aprimorar a aplicação das funções, foi desenvolvida uma função *llhd* para estabelecer o diâmetro do encanamento da linha lateral e a pressão no final da linha lateral. Tendo como parâmetros a vazão requerida nos emissores com uma taxa máxima de variação. Todavia, o código pode se tornar levemente mais demorado se comparado com a função que realiza exclusivamente uma única função de ajuste. Disponível no Apêndice F.

O ajuste da linha lateral foi considerado sem declive (Quadro 19), em aclave de 4% (Quadro 20) e em declive 4% (Quadro 21). Neste estudo de caso se mantiveram muito próximas a pressões finais, sendo elas de 9,38 mca; 9,32 mca e 9,47 mca respectivamente.

Os diâmetros apresentaram uma variação baixa, com respectivos valores de diâmetro interno 0,0057 m; 0,0059 m e 0,0056 m. Para a linha lateral, em nenhum momento se deve trabalhar com diâmetros interno menores que o diâmetro calculado, pois pode afetar diretamente a uniformidade de aplicação da água. Deve-se ressaltar que a função determina o diâmetro interno, mas cabe ao usuário verificar qual diâmetro comercial se aproxima do diâmetro calculado pela função.

Quadro 19 - Estabelecer a pressão inicial na linha lateral pelo diâmetro sem declividade.

```
> llhd(
  D = 0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  Se = 1,
  ne = 10,
  dec = 0.00,
  qreq = 3.33333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-10,
  qvr = 10
)

$D
[1] 0.005724677
$Hfim

[1] 9.387207

$iter
[1] 118

$tempo
elapsed
  0.06
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 20 - Estabelecer a pressão inicial na linha lateral pelo diâmetro em aclave.

```
> llhd(
  D = 0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  Se = 1,
  ne = 10,
  dec = 0.04,
  qreq = 3.33333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-10,
  qvr = 10)

$D
[1] 0.005939198

$Hfim
[1] 9.317017

$iter
[1] 126

$tempo
elapsed
  0.06
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 21 - Estabelecer a pressão inicial na linha lateral pelo diâmetro em declive.

```
> llhd(
  D = 0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  Se = 1,
  ne = 10,
  dec = -0.04,
  qreq = 3.33333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-10,
  qvr = 10)

$D
[1] 0.005569671

$Hfim
[1] 9.47113

$iter
[1] 130

$tempo
elapsed
  0.06
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Um dos benefícios da função é que se o usuário fizer a conversão errada de mm para metros, que no caso exemplificado no Quadro 22 o usuário inseriu o diâmetro de 0,25 m o programa vai retorna o diâmetro que melhor atende as necessidades em m, evitando que o usuário escolha um diâmetro equivocado por causa de uma unidade mal dimensionada.

Quadro 22 - Estudo de caso com a aplicação de um diâmetro em cm.

```
> llhd(D = 0.25,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  Se = 1,
  ne = 10,
  dec = 0.04,
  qreq = 3.33333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-10,
  qvr = 10)
$D
[1] 0.005939198
$Hfim
[1] 9.317017
$iter
[1] 126
$tempo
elapsed
0.06
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

4.6 ESTABELEECER A SUBUNIDADE

Foi proposta o ajuste levando em consideração a subunidade, por meio da função *subuni*. Deve se ressaltar que o dimensionamento da linha de derivação foi conforme uma linha lateral. A função foi determinada pela variação da vazão pela alteração do diâmetro da linha de derivação de uma subunidade de irrigação. Foi calculada pela função denominada *subunid*, disponível no Apêndice H. Realizou-se uma aplicação da função, com os seguintes parâmetros:

- Pressão no final da linha lateral: 10 mca;
- Coeficiente do emissor (K): $1,053 \cdot 10^{-6}$;
- Coeficiente do emissor (x): 0,5;
- Espaçamento os emissores (SeLL): 1 m
- Espaçamento na linha de derivação (SeLD): 4 m;
- Número de linhas laterias (nLL): 10 unidades;
- Número de emissores (ne): 100 unidades;

- Variação da vazão dos emissores (qvr): 10%;
- Vazão requerida dos emissores (qreq): $3,333 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Declividade (dec): 0% e 1 %.

O estudo de caso com declive zero e com uma pressão no final da linha de derivação com 10 mca e um diâmetro da linha de derivação de 0,025 m para se ter uma variação de vazão de 10% deve se usar um diâmetro interno de 0,036 m. Caso não exista o diâmetro interno mencionado deve se escolher um diâmetro interno acima de 0,036, para que se tenha uma variação de vazão próxima a 10%. A função *subunid* retorna o valor do diâmetro interno da linha de derivação (D), variação de vazão (qv) que é um parâmetro que pode ser alterada pelo usuário, o número de iterações pelo método da bisseção (iter) para determinar o diâmetro que atenda a variação desejada da vazão e o tempo (elapsed) de processamento da função.

Quadro 23 - Estabelecer a variação da vazão pelo diâmetro para a subunidade.

```
> subunid(HfimLD = 10,
  DLL = 0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  SeLL = 1,
  SeLD = 4,
  nLL = 10,
  ne = 100,
  qvr = 10,
  dec = 0.0,
  imax = 100,
  toler = 1e-6,
  DLDa = 1,
  DLDb = 0)
$D
[1] 0.0359791
$qv
[1] 10
$iter
[1] 27
$tempo
elapsed
  8.99
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

No estudo de caso com aclive de 1%, não foi possível determinar o diâmetro ideal com os parâmetros utilizados para atender a condição (Quadro 24) devido ao fato da variação de vazão ficar determinada em, no mínimo, 10,08%. O diâmetro é muito grande e não alcançaria a uniformidade desejada, visto que o diâmetro máximo utilizado foi de 1 metro é não alcançaria a uniformidade desejada de 10%. O usuário pode alterar o valor da variação da vazão desejada ou a pressão no final da linha de derivação.

Quadro 24 - Estabelecer a variação da vazão pelo diâmetro com declividade de 1%.

```
> subunid(HfimLD = 10,
  DLL = 0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  SeLL = 1,
  SeLD = 4,
  nLL = 10,
  ne = 100,
  qvr = 10,
  dec = 0.01,
  imax = 100,
  toler = 1e-6,
  DLDa = 1,
  DLDb = 0)
Error: Não foi possível resolver esta condição: qv inicial= 10.3678632797
031 qv desejado = 10
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Foi proposto aumentar a pressão no final da linha de derivação para 20 mca, conforme Quadro 25. Neste caso, o diâmetro da linha de derivação para atender 10% de variação de vazão foi de 0,041 metros, sendo necessário 25 iterações pelo método da bisseção para determinar o diâmetro ideal com um tempo de processamento de 7,42 segundos.

Quadro 25 - Estabelecer a variação da vazão pelo diâmetro para a subunidade.

```
> subunid(HfimLD = 20,
  DLL = 0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  SeLL = 1,
  SeLD = 4,
  nLL = 10,
  ne = 100,
  qvr = 10,
  dec = 0.01,
  imax = 100,
  toler = 1e-6,
  DLDa = 1,
  DLDb = 0)
$D
[1] 0.0404608
$qv
[1] 10
$iter
[1] 25
$tempo
elapsed
  7.42
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

A função *subnih* define a pressão no final da linha de derivação, com a condição de vazão média requerida dos emissores determina pelo usuário. Para este estudo de caso foi

utilizado a vazão de média de $3,333 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que é uma vazão comum em sistemas de gotejamentos. O estudo de caso em aclave apresentou maior pressão de 10,756 mca, seguido da situação sem declive que teve pressão no final da linha de derivação de 10,621 mca, e então em declive 10,432 mca (Quadros 26, 27 e 28). A função retorna o valor médio da vazão dos emissores (qsis) que foi determinado na função. Todavia, é tolerado uma diferença do valor de $1 \cdot 10^{-10}$. O número de iterações necessárias pelo método de bisseção e o tempo que o algoritmo demora para a resolução em tempo de processamento em segundo. A função se encontra disponível no Apêndice I.

Quadro 26 - Função *subunih* sem declividade.

```
> subunih(
  DLL=0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  DLD = 0.04,
  SeLL = 1,
  SeLD = 4,
  nLL = 10,
  ne = 100,
  dec = 0.0,
  vreq = 3.333333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-10,
  HfimLDa = 100,
  HfimLDb = 0
)

$Hfim
[1] 10.62164

$qsis
[1] 3.33331e-06

$iter
[1] 16

$tempo
elapsed
  4.81
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 27 - Função *subunih* em aclave.

```
> subunih(DLL=0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  DLD = 0.04,
  SeLL = 1,
  SeLD = 4,
  nLL = 10,
  ne = 100,
  dec = 0.01,
  vreq = 3.333333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-10,
  HfimLDa = 100,
  HfimLDb = 0)
```

\$Hfim

[1] 10.75592

\$qsis

[1] 3.333262e-06

\$iter

[1] 16

\$tempo

elapsed
4.91

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 28 - Função *subunih* em declive.

```
> subunih( DLL=0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  DLD = 0.04,
  SeLL = 1,
  SeLD = 4,
  nLL = 10,
  ne = 100,
  dec = -0.01,
  vreq = 3.333333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-10,
  HfimLDa = 100,
  HfimLDb = 0)
```

\$Hfim

[1] 10.43243

\$qsis

[1] 3.333258e-06

\$iter

[1] 16

\$tempo

elapsed
4.77

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

A função *subunihd* determinou a pressão no final da linha de derivação e o diâmetro para a linha de derivação em uma subunidade. Neste estudo de caso não usamos declividade, e com os parâmetros:

- Diâmetro da linha lateral (DLL): 0,025 m;
- Coeficiente do emissor (K): $1,053 \cdot 10^{-6}$;
- Coeficiente do emissor (x): 0,5;
- Espaçamento os emissores (SeLL): 1 m;
- Espaçamento na linha de derivação (SeLD): 4 m;
- Número de linhas laterais (nLL): 10 unidades;
- Número de emissores (ne): 100 unidades;
- Variação da vazão dos emissores (qvr): 10%;
- Vazão requerida dos emissores (qreq): $3,333 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Foram determinados assim, a pressão no final da linha de derivação de 9,45 mca e o diâmetro da linha de derivação 0,067 m (Quadro 29). Para atender os critérios de vazão do emissor de $3,333 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e uma variação de vazão de 10% deve se usar o diâmetro interno da linha de derivação de 0,067, caso não exista, aconselha-se usar um diâmetro superior ao calculado. A pressão deve ser recalculada, utilizando a função *subunih* para atender os critérios.

Quadro 29 - Ajuste da subunidade de diâmetro e pressão final.

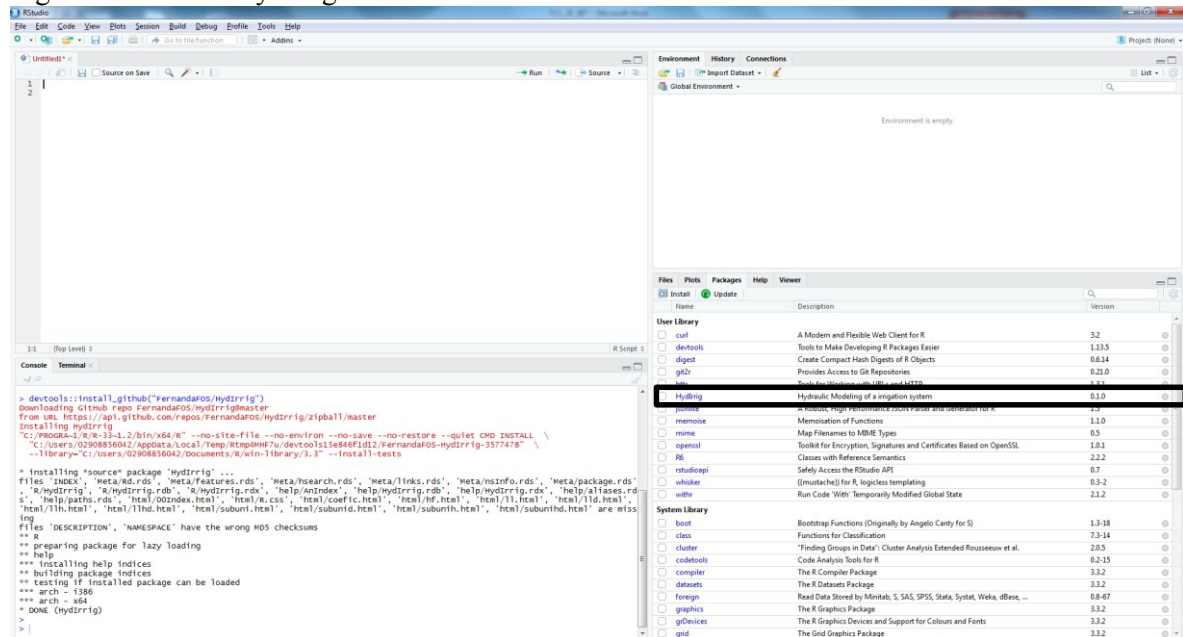
```
> subunihd(DLL = 0.025,
  K = 1.053e-6,
  x = 0.5,
  DLD = 0.04,
  SeLL = 4,
  SeLD = 1,
  nLL = 100,
  ne = 10,
  dec = 0.0,
  qreq = 3.33333e-6,
  imax = 100,
  toler = 1e-6,
  qvr = 10)
$D
[1] 0.06713115
$Hfim
[1] 9.454346
$iter
[1] 170
$tempo
elapsed
12.9
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

4.7 PACOTE HydrIrrig

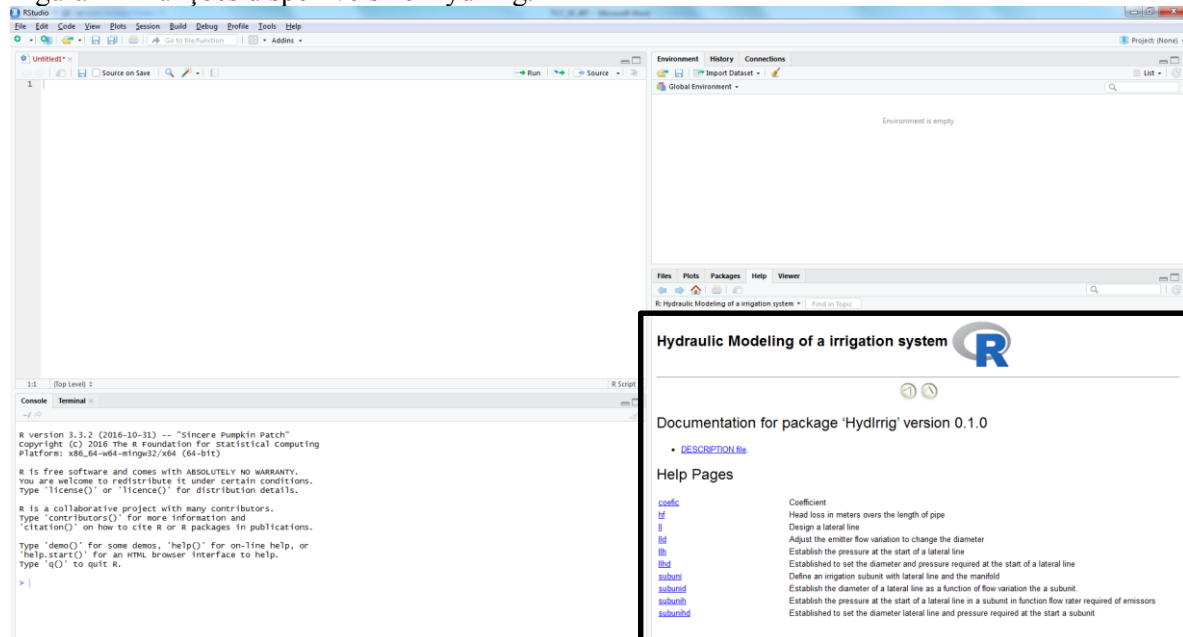
O pacote está disponível em <https://github.com/FernandaFOS/HydrIrrig>. É indicado utilizar o pacote *devtools* para a instalação, com o comando `install_github("FernandaFOS/HydrIrrig")`. Ao carregar o pacote no RStudio ficará disponível (Figura 10) e as funções que o pacote possui (Figura 11).

Figura 10 - Pacote HydrIrrig.



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

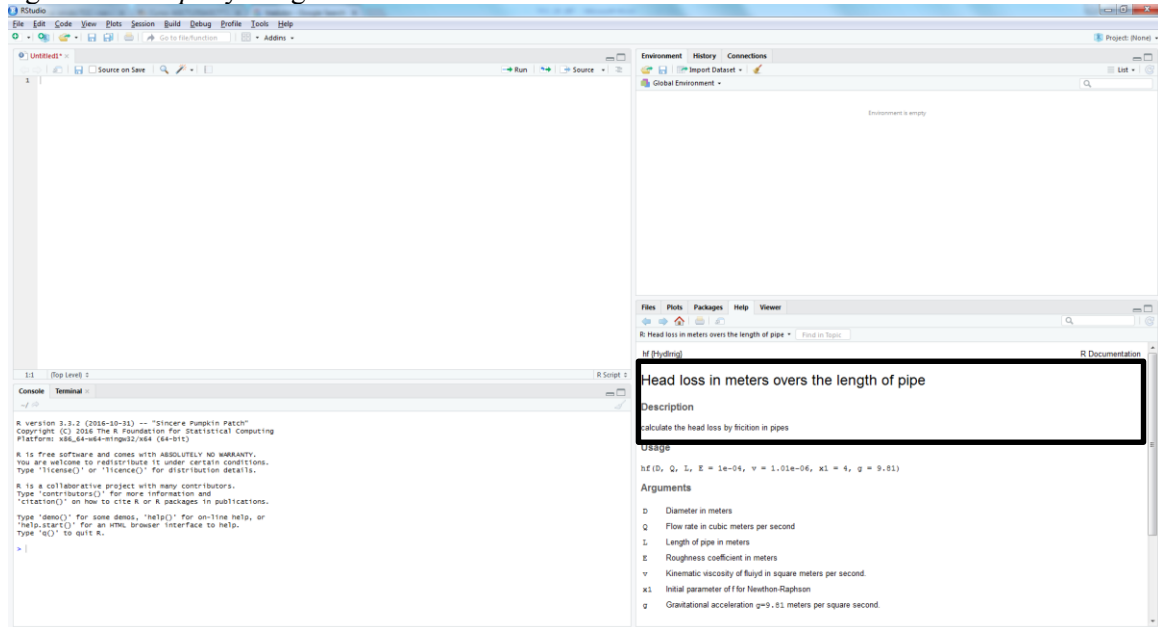
Figura 11- Funções disponíveis no HydrIrrig.



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Para auxiliar o usuário cada função possui uma descrição, *Help*. Foi utilizado o *hf* para exemplificação, R documentation exhibe a definição e a descrição (Figura 12).

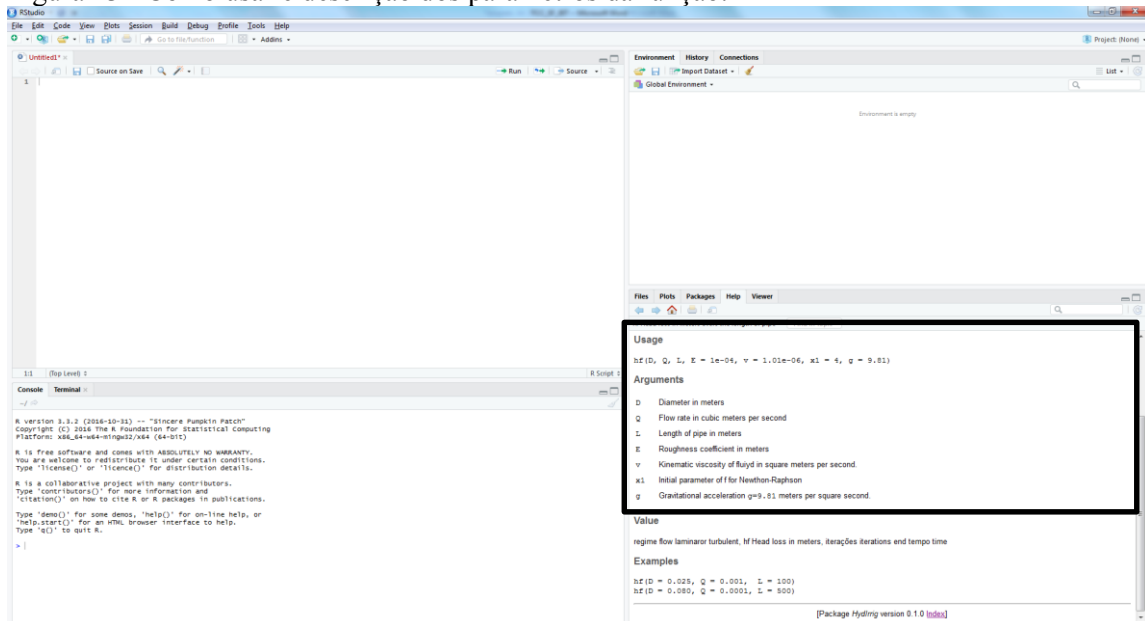
Figura 12 - *Help* HydIrrig.



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Como usar a função e a descrição de todos os seus parâmetros além das unidades de medida são apresentados ao usuário, conforme Figura 13.

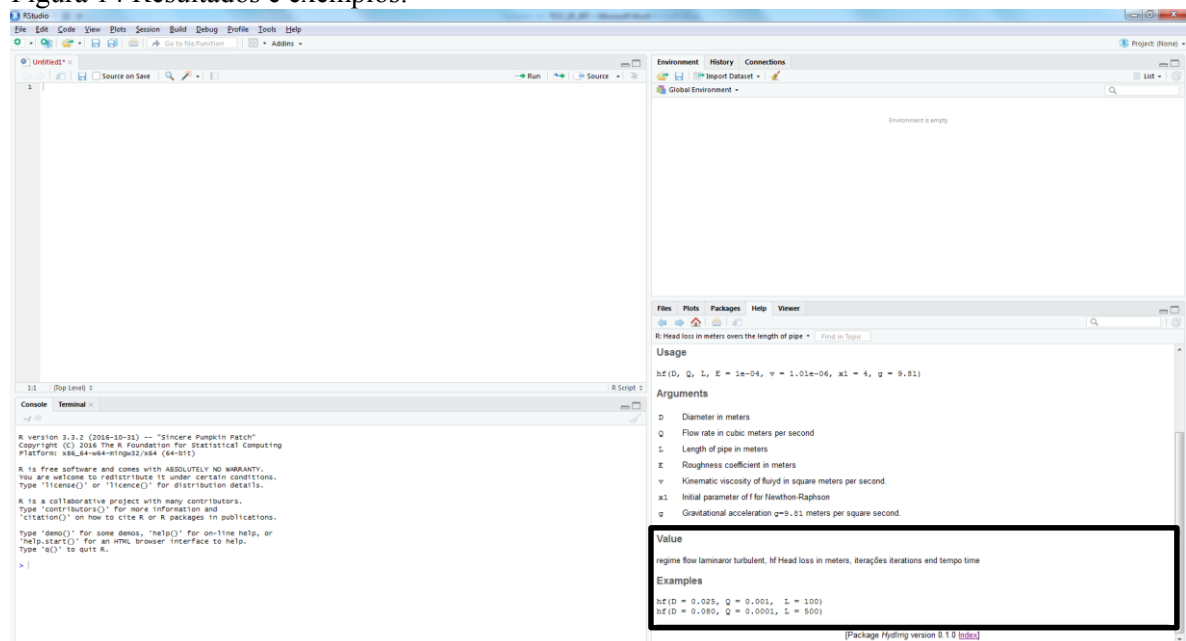
Figura 13 - Como usar e descrição dos parâmetros da função.



Fonte: Elaborada pela autora (2018).

O *value* apresenta o que a função determina, que para o caso do *hf*, o tipo de regime, laminar ou turbulento; a perda de carga em metros; o número de iterações para se chegar à resolução, o tempo em que o sistema leva para a execução do processo em segundo. Expõem duas aplicações da função (Figura 14).

Figura 14 Resultados e exemplos.

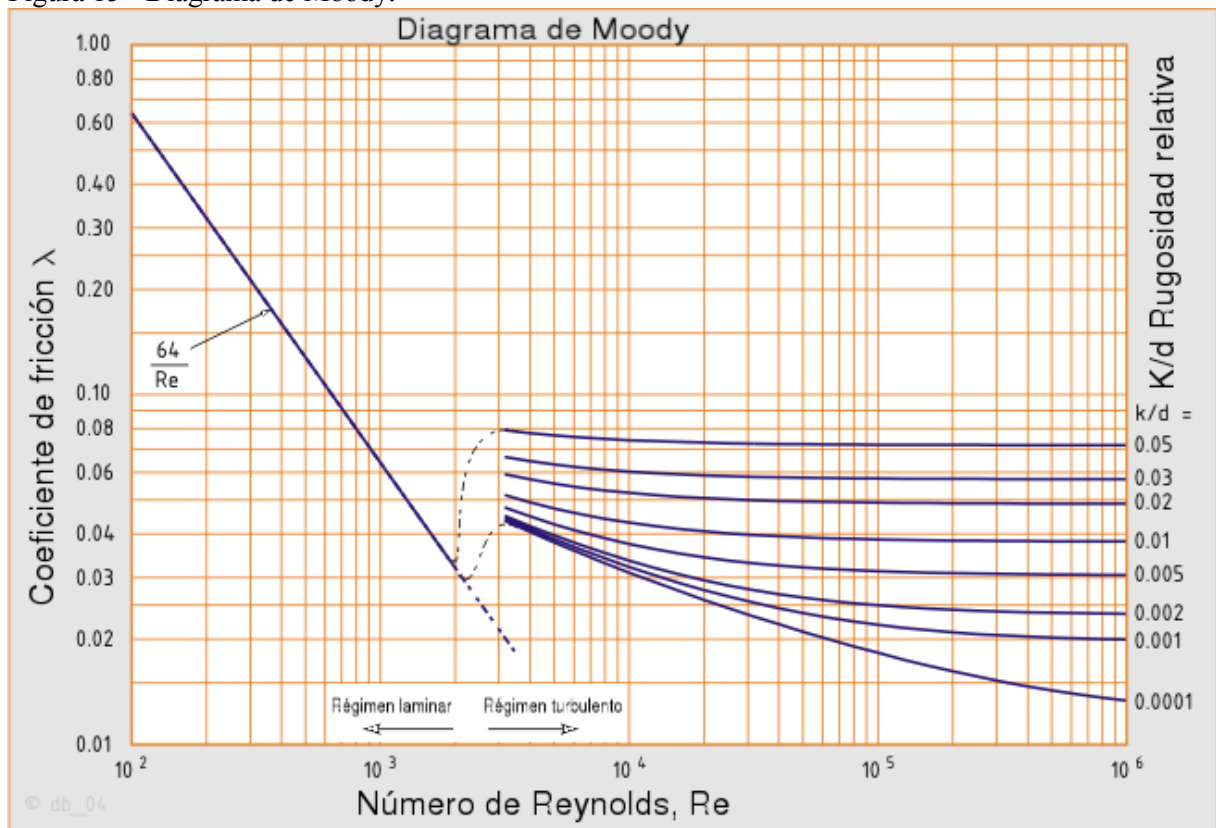


Fonte: Elaborada pela autora (2018).

5 DISCUSSÃO

O fator de atrito (f) em regime turbulento foi determinado utilizando o método de Newton-Rapson para resolver a equação de Colebrook-White. Segundo Cunha (2000), o método une duas ideias básicas comuns nas aproximações numéricas: linearização e iteração. Para a mesma situação consegue-se determinar o f por meio do Diagrama de Moody (Figura 15), em situações que se conhecem os valores de Re e ε/D (Fox et. al., 2018). O método gráfico tem como limitação não chegar a um valor exato se comparado com a equação de Coolebrook-White resolvida pelo método de Newton Rapson. A aplicação de uma função para determinar a perda de carga apresenta como vantagem determinar o coeficiente de atrito de uma forma simples e rápida.

Figura 15 - Diagrama de Moody.



Fonte: Google imagens, 2018.

Com o avanço da tecnologia equações matemáticas podem ser implementadas em diversas linguagens de programação, determinando-se assim a forma mais eficiente. Segundo Fox et al. (2018) as equações podem até ser implementadas em Excel, entretanto, as mesmas não são automatizadas.

A análise hidráulica foi estudo de vários pesquisadores e com o avanço da informática foram desenvolvidas diferentes abordagens. O método analítico foi alvo de estudos por abordar mais detalhadamente a relação entre a entrada e parâmetros de saída (ZAYANI et al., 2001; SADEGHI et al., 2012; SADEGHI; PETERS, 2012, 2013). Todavia, as soluções numéricas por etapas (HATHOOT et al., 1993, 2000) como bem como FEMs (BRALTS et al., 1995) são sugeridas na literatura com maior nível de precisão, uma vez que aplicam repetidamente equações básicas da hidráulica.

Segundo Valiantzas (1998, 2002) o *Backstep* possui uma maior precisão, visto que em cada seção foi aplicado Equações Básicas da Hidráulica. O autor comenta que talvez, necessitasse de um alto nível de programação e muitas vezes um longo período de tempo para a execução do algoritmo. No trabalho presente, as funções apresentaram tempo desprezível para os processamentos dos dados. As que apresentaram um tempo maior, foi devido a aplicar repetidamente o mesmo cálculo para se chegar a uma condição estabelecida, tal como: determinar vazão média dos emissores ou a variação da vazão.

Martin (2011) comenta que para se obter um software prático e rápido deve-se ter um código limpo, acessível às mudanças do programa e a possibilidade de agregar novas variáveis. Apresenta como benefícios o aumento de produtividade do usuário, ou seja, a diminuição do tempo de execução das tarefas. As linguagens computacionais estão cada vez mais acessíveis para diversas áreas do conhecimento, mas sempre deve se priorizar um código limpo e com o mínimo tempo de execução.

Um sistema de irrigação localizada é uma estrutura hidráulica em que o design é limitado pela uniformidade e consequentemente pela perda de carga (AGIRALIOGLU; YILDIRIM, 2002). Segundo Wu (1997), determinar a pressão na entrada é de suma importância, uma vez que afeta na uniformidade da emissão. As funções desenvolvidas determinam a pressão de entrada para uma única linha lateral ou em uma subunidade, por meio de equações básicas da hidráulica.

Christiansen (1942) recomendou a aplicação de um fator F para evitar o cálculo do passo a passo, mantendo uma precisão relativamente boa. Entretanto, com a evolução da computação consegue-se calcular o passo a passo com eficiência e tempo mínimo de processamento. Apresenta-se como vantagem estabelecer com precisão a perda de pressão causada pelo atrito.

De acordo com Bucks e Nakayama (1986) estabelecer uma limitação na pressão e, consequentemente, nas variações da taxa de fluxo do emissor pode ser considerado um critério de projeto válido para as laterais de gotejamento. YILDIRIM (2015) argumenta que a

análise adequada da linha lateral é de suma importância para a concepção e avaliação de um sistema de irrigação, em que uma das principais funções é determinar as características de diâmetro, comprimento e pressão de entrada de operação.

A determinação do diâmetro não deve ser negligenciada, uma vez que diâmetros menores proporcionam a desuniformidade de aplicação da água. Diâmetros maiores proporcionam a redução da velocidade do fluxo, logo, resultando em pressões menores, reduzindo problemas de golpe de ariete e perdas reduzidas por fricção. No entanto, podem acrescentar um custo adicional ao projeto (CLARCK et al., 2005).

As características de fluxos hidráulico são parâmetros importantes para o dimensionamento, as quais são: vazão e pressão do emissor, e vazão e pressão na linha lateral e perda de carga.

Warrick e Yitayew (1988) apresentaram um tratamento alternativo para as linhas laterais de gotejamento, no qual usaram uma equação polinomial de segunda ordem. A descarga do fluxo é considerada como uma função contínua do comprimento, em que a função de descarga é variável. No presente trabalho levou-se em consideração que a vazão em cada emissor era variável com a pressão em cada ponto da linha lateral. Um dos benefícios do backstep foi de proporcionar ao usuário a conhecer o perfil de vazão e pressão na linha ou na subunidade.

Kang e Nishiyama (1996a) descreveram a relação entre a vazão de entrada e a pressão de entrada das linhas laterais por meio de uma equação polinomial. Entretanto, Jain, Singh e Singh (2002) descreveram o uso de uma equação potência simples para descrever essa relação entre o cabeçal de pressão de entrada e a taxa de fluxo de entrada do lateral, justificando a similaridade no sistema hidráulico de linhas laterais e emissores. Os autores também demonstraram as vantagens de usar uma equação potência contra a equação polinomial, ressaltando que a equação polinomial em diâmetros relativamente pequenos não apresenta acurácia, podendo comprometer o sistema em nível de uniformidade.

Kale, Singh e Mahar (2008) propuseram um modelo linear para o projeto ideal, sendo que os mesmos utilizaram o método passo a passo para a verificação do funcionamento da pressão de entrada obtido pelo método proposto.

O ótimo desempenho de um sistema de irrigação depende de um design apropriado, o qual pode ser alcançado mediante uma análise hidráulica apropriada (SADEGHI; PETERS, 2013). Yildirim (2015) desenvolveu um algoritmo na linguagem Visual Basic que, por meio de condições, se chega à uniformidade desejada do sistema ainda na fase de projeção na linha

lateral. Sadegh e Peters (2013) comentam sobre a importância da uniformidade no sistema de irrigação, determinar uma uniformidade específica em fase de projeto. As funções *lld* e *subunid* foram desenvolvidas para determinar o diâmetro para uma linha lateral ou para a linha de derivação da subunidade para atender a uniformidade de vazão entre os emissores máximo e mínimo que não passasse de 10% ainda em fase de projeto, para atender esses parâmetros foi testando diferentes valores para o diâmetro.

Sadeghi, Peters e Lamm (2015) propoem a determinação do máximo comprimento da linha lateral para uma uniformidade requerida, utilizando uma abordagem analítica.

Jiang e Kang (2010b) propuseram um estudo para avaliar a uniformidade de aplicação considerando declives utilizando o método *backstep*. Utilizaram o coeficiente de uniformidade de Christiansen, coeficiente de uniformidade de distribuição, uniformidade de emissão, coeficiente de variação e variação de descarga do emissor para avaliar a uniformidade do sistema de microirrigação. O coeficiente de uniformidade de Christiansen, coeficiente de variação e variação de descarga do emissor mostraram alta correlação nas regressões, sendo que se apresentaram como os melhores parâmetros para o uso na avaliação de sistemas de irrigação independentes da inclinação. No entanto, foi constatado que o método de variação da vazão do emissor foi melhor para áreas sem declive ou com leve inclinação.

Wang et al. (2015) desenvolveu um script em MATLAB para um estudo de caso, onde comenta que alcançar uma alta uniformidade pode se sair caro. O script determina o tamanho ideal da subunidade e o diâmetro, mas os autores comentam que no design do sistema deve-se incluir o menor diâmetro possível. Entretanto, o Matlab é um software pago, limitando a disponibilidade aos usuários.

6 CONCLUSÃO

As funções desenvolvidas se apresentaram como uma ferramenta rápida e simples para determinar o dimensionamento hidráulico de um sistema de irrigação. A implementação em um pacote em linguagem R, denominada HydIrrig se apresentou como uma ferramenta prática para o dimensionamento hidráulico de uma única linha lateral ou para uma subunidade de irrigação.

Outras funções podem ser incorporadas ao pacote, como a criação de uma função para determinar a melhor posição de saída da linha lateral e da linha de derivação e como a declividade influencia na posição da linha de derivação e desenvolver uma função com múltiplas subunidades.

Neste contexto, apesar do sistema hidráulico ter sido estudados por diversos autores ao longo dos anos, com o avanço da tecnologia consegue-se abordar esse tema de formas diferentes.

REFERÊNCIAS

- AĞIRALIOĞLU, N.; YILDIRIM, G. **Determining water requirements for landscape irrigation in Istanbul Region**. In: Conf. on Water Resources Management in Arid Regions, Kuwait Institute for Scientific Research (KISR), Kuwait, 2002.
- ANA. **Atlas Irrigação: Uso da Água na Agricultura Irrigada**. Brasília, 2017. 86 p.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2013**. Brasília: ANA, 2014, 432 p. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2013_rel.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2018.
- ANDRADE, D. F.; OGLIARI, P. J. **Estatística para as ciências agrárias e biológicas: Com noções de experimentação**. 3 ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2013. 478p.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDES, M. F. **Manual de Hidráulica**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.
- AYARS, J. E.; BUCKS, D. A.; LAMM, F. R.; NAKAYAMA, F. S. Introduction. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for crop production**, Amsterdam: Elsevier, 2007, cap.1.
- BARBOSA, J. C. Modelagem e Modelos Matemáticos na Educação Científica. **Revista de Educação em Ciências e Tecnologia**, v.2, n.2, 2009.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. Viçosa: UFV, 2011.
- BRALTS, V. F.; GERRISH, P. J.; YUE, R. **An improved finite element model for the analysis of microirrigation systems. Proc.** In: Microirrigation Congress, Orlando, FL, 1995.
- BUCKS D. A.; NAKAYAMA F. S. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. New York: Elsevier, 1986. 383 p.
- BUCKS, D. A.; MYERS, L. E. Trickle irrigation-application uniformity from simple emitters. **Transactions of the. ASABE**, v.16, n.6, p. 1108 -1111, 1973.
- CASTIBLANCO, C. J. M. Modelo computacional para o dimensionamento da subunidade em irrigação localizada. 2013. 120 f. Tese (Doutor em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. College of Agriculture. Experiment Station, 1942. 124p.
- CLARK, G. A.; HAMAN, D. Z.; PROCHASKA, J. F.; YITAYEW, M. General system design principles. In: LAMM, F. R.; AYARS, J. E.; NAKAYAMA, F. S. **Microirrigation for crop production**, Amsterdam: Elsevier, 2007, cap.5.

CUNHA, M. C. **Métodos numéricos**. 2 ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2000. 280 p.

FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture. Managing systems at risk. New York. 2011.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em :<<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>>. Acesso: 20 abr 2017.

FGV EESP, GV AGRO. **ESTUDO SOBRE EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NO BRASIL: ANÁLISE DO IMPACTO DA IRRIGAÇÃO NA AGRICULTURA BRASILEIRA E POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE ALIMENTOS FACE AO AQUECIMENTO GLOBAL**. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/17675/Efici%C3%Aancia_do_Uso_da_%C3%81gua_no_Brasil_Relat%C3%B3rio_Completo.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2018.

FREITAS, P. M.; GONÇALVES, R. P.; TEIXEIRA, A. F.; FREITAS, D. M. **Software Gotejador: Sistema para Dimensionamento e Análise de Custo de Projetos de Irrigação por Gotejamento**. In: IV Congresso Brasileiro da Sociedade Brasileira de Informática Aplicada à Agropecuária e à Agroindústria - SBIAgro, 2003. Porto Seguro. Anais do IV Congresso de Lavras, 2003.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T; MITCHELL, J. W. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 724 p.

GITHUB. Github. Disponível em:< <https://github.com/>>. Acesso em: 04 fev. 2018.

GUO, D.; WESTRA, S.; PETERSON, T. **Package ‘Evapotranspiration’**. Disponível em: < <https://www.rdocumentation.org/packages/Evapotranspiration/versions/1.12>>. Acesso em: 04 abr. 2018.

HATHOOT, H. M.; AL-AMOUD, A. I.; AL-MESNED, A. S. Design of trickle irrigation laterals considering emitter losses. **ICID Jornal.**, v.49, n.2, p.1 -14, 2000.

HATHOOT, H. M.; AL-AMOUD, A. I.; MOHAMMAD, F. S. Analysis and design of trickle irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engeering**, v. 119, n. 5, p.756-767, 1993.

HOWELL, T. A.; HILER, E. A. Trickle irrigation lateral design. **Transactions of the. ASABE**, v.17, n.5, p. 902-908, 1974.

IICA. Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura **A irrigação no Brasil: situação e diretrizes**. Brasília: IICA, 2008.

JAIN, S. K.; SINGH, K. K.; SINGH, R. P. Microirrigation Lateral Design using Lateral Discharge Equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engeering**, v. 128, n. 2, p. 125 - 128, 2002.

JIANG, S.; KANG Y. Simple Method for the Design of Microirrigation Paired Laterals on Sloped Fields. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.136, n.4, p. 271-275, 2010a.

JIANG, S.; KANG, Y. Evaluation of Microirrigation Uniformity on Laterals Considering Field Slopes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.136, n.6, p. 429 – 434, 2010b.

JUANA, L.; LOSADA, A.; RODRIGOEZ-SINOBAS, L.; SANCHEZ, R. Analytical relationships for designing rectangular drip irrigation units. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.120, n.1, p. 47 – 59, 2004.

LUCENA, K. F. M. EPANET-IRRIG: Aperfeiçoamento do EPANET para Aplicações em Sistemas de Irrigação. João Pessoa: **Principia**, n. 20, p. 9-21, 2012.

KALE, R. V.; SINGH, R. P.; MAHAR, P. S. Optimal Design of Pressurized Irrigation Subunit. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.134, n.2, p. 137 -146, 2008.

KANG, V.; NISHIYAMA, S. Analysis and design of microirrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.122, n.2, p.75 -86, 1996a.

KANG, V.; NISHIYAMA, S. Design of micro-irrigation sub-main unit. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.122, n.2, p.83 -90, 1996b.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkler and trickle irrigation: An Avi book**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle Irrigation Design. Rainbird Sprinkler Manufacturing**. California: Corporation: Glendora, 1975, 133 p.

KESHTGAR, A.; BHUIYAN, M. A.; JAYASURIYA, N. DESIGN OF DRIP IRRIGATION SYSTEM USING MICROTUBES FOR FULL EMISSION UNIFORMITY. **Irrigation and Drainage**, n.62, p. 613-623, 2013.

MARTIN, R.C. **Código Limpo: Habilidades Práticas do Agile Softwares**. Rio de Janeiro: ALTA BOOKS, 2011.

MAUPIN, M. A. et al. **Estimated use of water in the United States in 2010**. Virginia: USGS, 2014, 56 p. (Circular, 1405).

MOEYS et al. **Package ‘soiltexture’**. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/soiltexture/vignettes/soiltexture_vignette.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2018.

MONSERRAT, J.; BARRAGAN, J.; COTS L. Design of Paired Laterals on Uniformly Sloping Fields. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.144, n.6, 2018.

MONTOVANI, E. C.; BERNARDO S.; PALARETTI, L.F. **IRRIGAÇÃO: princípios e métodos**. Viçosa: UFV, 2011.

SADEGHI, S. H.; PETERS, T. Analytical determination of distribution uniformity for microirrigation tapered laterals laid on uphill and horizontal slopes. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, n.6, p.483 – 489, 2012.

SADEGHI, S. H.; PETERS, T. Adjusted friction correction factor for center-pivots with an end-gun. **Irrigation Science**, v.31, n.3, p.351-358, 2013.

SADEGHI, S. H.; PETERS R. T.; LAMM F. R. Design of Zero Slope Microirrigation Laterals: Effect of the Friction Factor Variation. **J. Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.141, n.10, p. 04015012-1 – 04015012-9, 2015.

SADEGHI, S. H.; MOUSAVI, S. F.; SADEGHI, S. H. R.; ABDOLALI, M. Factor H for the calculation of head loss and sizing of dual-diameter laterals. **J. Agric. Sci. Technol.**, v.14, p.1555-1565, 2012.

SCALOPPI, E. J.; ALLEN, R. G. Hydraulics of irrigation laterals: Comparative analysis. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.119, n.1, p. 91 -115, 1993.

SILVA, F. O.; ITAKO, A. T; TOLENTINO JÚNIOR, J. B. Mycelial growth assessment by digital image analysis in R software environment. **IDESIA**, v.35, n.1, p. 7- 10, 2017.

SILVA, F. O.; TOLENTINO JUNIOR, J. B. **HF: An R package for calculation of pipe friction loss**. In: CRHIAM Inovagri International Meeting, 2016, Concepcion. Proceedings of CRHIAM Inovagri International Meeting, 2016a.

SILVA, F. O.; TOLENTINO JUNIOR, J. B. **Model for hydraulic design of irrigation lateral lines**. In: CRHIAM Inovagri International Meeting, 2016, Concepcion. Proceedings of CRHIAM Inovagri International Meeting, 2016b.

TAIZ, L.; MURPHY, A; MOLLER, I. M. ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

VALIANTZAS, J. D. Hydraulic analysis and optimum design of multidiameter irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.128, n. 2, p 78 -86, 2002.

VALIANTZAS, J. D. Analytical approach for direct drip lateral hydraulic calculation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.124, n.6, p. 300 -305, 1998.

VALLESQUINO, P.; LUQUE-ESCAMILLA, P. L. New algorithm for hydraulic calculation in irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 127, n.4, p. 254 - 269, 2001.

VALLESQUINO, P.; LUQUE-ESCAMILLA, P. L. Equivalent friction factor method for hydraulic calculation in irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 128, n.5, p. 278 -286, 2002.

VENABLES, W. N.; SMITH, D. M. **An Introduction to R**. Disponível em: < <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/R-intro.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

ZAYANI, K., ALOUINI, A., LEBDI, F.; LAMADDALENA, N. Design of drip line in irrigation systems using the energy drop ratio approach. **Transactions of the ASABE**, v.44, n.5, p. 1127 -1133, 2001.

WANG, J.; ZHU, D; ZHANG, L; AMES, D. P. Economic Analysis Approach for Identifying Optimal Microirrigation Uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.141, n.8, p. 04015002, 2015.

WARRICK, A. W.; YITAYEW, M. Trickle lateral hydraulics. I: Analytical solution. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v.114, n.2, p.289 -300, 1988.

WICKHAM, H. **R PACKAGES: Organize, Test, Document and Share Your Code**. United States of America: O' Reilly Media, 2015. 202 p.

WICKHAM, H.; HESTER, J.; CHANG, W. **Package 'devtools'**. CRAN, 2018. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/devtools/devtools.pdf>>. Acesso em: 28 mai. 2018.

WU, I. P. An assessment of hydraulic design of micro-irrigation systems. **Agric. Water Manage.**, v.32, p. 231 -243,1997.

WU, I. P. Design of drip irrigation main lines. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 101, n.1R4, p.265 -278, 1975.

WU, I. P. Energy gradient line approach for direct hydraulic calculation in drip irrigation design. **Irrigation Science.**, v.13, p. 21 – 29,1992.

WU, I. P.; GITLIN, H. M. Hydraulic and uniformity for drip irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.99, 1973.

WU, I. P.; GITLIN, H. M. Drip irrigation design based on uniformity. **Trans. ASAE**, v.17, n.3, 1974.

WU, I. P.; GITLIN, H. M. Energy gradient line for drip irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.101, n.4, p. 323 -326, 1975.

WU, I. P.; GITLIN, H. M.; SOLOMOM, K. H.; SARUWATARI, C. A. **Design principles: Trickle irrigation for crop production**. NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Elsevier Science, Phoenix, 1986.

WWDR. **Fatos e dados. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 4: O manejo dos recursos hídricos em condições de incerteza e risco**. Brasília: Unesco, 2012. 17 p.

WWDR. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2018. SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA PARA A GESTÃO DA ÁGUA: Fatos e dados**. Disponível em:<<http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002615/261579por.pdf>>. Acesso: 27 mai. 2018.

YILDIRIM, G. Determining operating inlet pressure head incorporating uniformity parameters for multioutlet plastic pipelines. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.134, n.3, 2008.

YILDIRIM, G. Simplified procedure for hydraulic design of small diameter plastic pipes. **Irrigation and Drainage**, v.58, n.3, p.209 -233, 2009.

YILDIRIM, G. Total energy loss assessment for trickle lateral lines equipped with integrated in-line and on-line emitters. **Irrigation Science**, vol.28, n. 4, p. 341 -352, 2010.

YILDIRIM, G. Computer-Based Analysis of Hydraulic Design Variables for Uniformly Sloping Microirrigation System Laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, vol.144, n.7, p.04014079, 2015.

YILDIRIM, G.; AĞIRALIOĞLU, N. Comparative Analysis of Hydraulic Calculation Methods in Design of Microirrigation Laterals. **Jornal Irrigation. And Drainage**, v.130, n.3,p.201-217, 2004.

YITAYEW, M.; WARRICK, A. W. Trickle lateral hydraulics. II: Design and examples. **J. Irrig. Drain. Eng.**, v.114, n.2, p.289 – 300, 1988.

APÊNDICE A – Função *hf*

Quadro 30 - Script Função *hf*.

```
#' Head loss in meters overs the length of pipe
#
#' calculate the head loss by fricition in pipes
#' @param D Diameter in meters
#' @param Q Flow rate in cubic meters per second
#' @param L Length of pipe in meters
#' @param v Kinematic viscosity of fluiyd in square meters per second.
#' @param E Roughness coefficient in meters
#' @param x1 Initial parameter of f for Newthon-Raphson
#' @param g Gravitational acceleration \code{g=9.81} meters per square
#'second.
#
#' @return regime flow laminar or turbulent, hf Head loss in meters,
iterações number iterations end tempo time
#
#' @export
#' @examples
#' hf(D = 0.025, Q = 0.001, L = 100)
#' hf(D = 0.080, Q = 0.0001, L = 500)
# Function hf
hf <- function (D,
                Q,
                L,
                E = 1e-4,
                v = 1.01e-6,
                x1 = 4,
                g = 9.81)
{
  # Time
  ptm <- proc.time()
  i = 0
  A = ((pi * (D ^ 2)) / 4)
  V = Q / A
  Re = V * D / v
  if (Re < 2000)
    # Flow laminar
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 31- Continuação Script Função *hf*.

```

{
  regime = "regime laminar"
  fi = 64 / Re
  hf = fi * (L / D) * ((V ^ 2) / (2 * g))
  #   return (hf)
}

else
# Flow turbulent
{
  regime <- "regime turbulento"
  dif <- 1
  x2 <- x1 + 1

  while (dif >= 1e-12) {
    i <- i + 1

    w <- (E / (3.7 * D)) + ((2.51 * x1) / Re)

    h <- (2.18 / (((E * Re) / (3.7 * D)) + (2.51 * x1)))

    x2 <- x1 - (((x1 + (2 * log10(
      w
    ))) / (1 + h)))

    dif <- abs(x2 - x1)
    x1 <- x2
  }
  fi = 1 / x1 ^ 2
  hf = fi * (L / D) * ((V ^ 2) / (2 * g))
}
return(list(
  "regime" = regime,
  "hf" = hf,
  "iteração" = i,
  tempo = (proc.time() - ptm)[3]
))}

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

APÊNDICE B – Função *coefic*

Quadro 32 - Script Função *Coefic*.

```
#' Coefficient
#
#' Calculate the coefficients of lateral line
#
#' @param K Emission coefficient
#' @param x Emission exponent
#' @param D Diameter in meters
#' @param Se Emitter spacing in meters
#' @param ne Number of emitters
#' @param dec Slope on the lateral line
#' @param HL Pressure at the end of the manifold in mca
#' @return coefficient a, b e c
#' @export
#' @examples
#' coefic( K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.015, Se = 1, ne = 100,
#'dec = 0.00, HL = c(1, 100, 0.5))
#' coefic( K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.015, Se = 1, ne = 100,
#'dec = -0.01, HL = c(1, 100, 0.5))
# Function coefficcients lateral line
coefic <- function (K, x, D, Se, ne, dec, HL = c(1, 100, 0.5)) {
  # Time
  ptm <- proc.time()
  HL1 = HL - 10
  HL2 = HL + 10
  HL3 = 0.5
  if (HL1 <= 1){HL1 <- 1}
  HL = c(HL1, HL2, HL3)

  # Defines the simulations
  Hfim <- seq(HL[1], HL[2], HL[3])

  # Simularion vectors
  HQ <-
  sapply(Hfim, function(y) {
    ll(
      Hfim = y,
      K = K,
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 33 - Continuação Script Função *Coefic.*

```

        x = x,
        D = D,
        Se = Se
        ne = ne,
        dec = dec*Se
    )))

Hini <- unlist(HQ[1, ])
Qini <- unlist(HQ[2, ])

options(warn = -1) #evita warnings

# Power equation: Qini=a*Hini^b
eq1 <- lm(log10(Qini) ~ log10(Hini))
a = 10 ^ summary(eq1)$coefficients[1]
b = summary(eq1)$coefficients[2]

# Linear equation: Hfim=c*Hini
eq2 <- lm(Hfim ~ 0 + Hini)
c = summary(eq2)$coefficients[1]

options(warn = 0) #reativa warnings

# Plot graphics
par(mfrow = c(1, 2))

plot(Qini ~ Hini)
curve(a * x ^ b, add = TRUE, col = "red")
plot(Hfim ~ Hini)
curve(c * x, add = TRUE, col = "red")

    return(
    list(
        "a" = a,
        "b" = b,
        "c" = c,
        tempo = (proc.time() - ptm)[3]
    )))

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

APÊNDICE C – Função ll

Quadro 34 - Script Função ll.

```
#' Design a lateral line
#
#' Calculate the pressure head and flow rate profile along a lateral
#' line
#
#' @param Hfim Pressure at the end of the line in mca
#' @param K Emission coefficient
#' @param x Emission exponent
#' @param D Diameter in meters
#' @param Se Emitter spacing in meters
#' @param ne Number of emitters
#' @param dec Slope on the lateral line
#
#' @return Hini pressure head at inlet of lateral, Qini flow rate at
#' inlet of the lateral, H pressure head in the emitter, q flow rate in
#' the emitter, flow rate in lateral line, hf head loss
#
#' @export
#
#' @examples
#' ll(Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 10,
#' dec = 0.00)
#' ll(Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 10,
#' dec = 0.01)
#' ll(Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 10,
#' dec = -0.01)
#' ll(Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 100,
#' dec = 0.00)
#' ll(Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 100,
#' dec = 0.01)
#' ll(Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, D = 0.025, Se = 1, ne = 100,
#' dec = -0.01)

# Function lateral line
ll <- function (Hfim, K, x, D, Se, ne, dec) {
# Time
  ptm <- proc.time()
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 35 - Continuação Script Função *ll*.

```

# Vectors

H <- c()
q <- c()
Q <- c()
Hf <- c()

# Last emitter / i = ne

H[ne] <- Hfim
q[ne] <- K * H[ne] ^ x #
#Q[ne] <- q[ne]
Q[ne] <- 0

#Loop i = 1
for (i in ne:2) {
  Q[i - 1] <- Q[i] + q[i]
  Hf[i - 1] <- hf(D = D, Q = Q[i - 1], L = Se)$hf
  H[i - 1] <- H[i] + (dec*Se) + Hf[i - 1]

  q[i - 1] <- K * H[i - 1] ^ x
}

# First section

Q <- c(Q[1] + q[1], Q[1:(ne - 1)])
Hf <- c(hf(D = D, Q = Q[1], L = Se)$hf, Hf)
Hini <- H[1] + (dec*Se) + Hf[1]

return (list(
  "Hini" = Hini,
  "Qini" = sum(q),
  "H" = H,
  "q" = q,
  "Q" = Q,
  "Hf" = Hf,
  tempo = (proc.time() - ptm)[3]
))
}

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

APÊNDICE D – Função *lld*

Quadro 36 - Script Função *lld*.

```
#' Adjust the emitter flow variation to change the diameter
#
#' Set the diameter of a lateral line
#
#' @param Hfim Pressure at the end of the line in mca
#' @param K Emission coefficient
#' @param x Emission exponent
#' @param D Diameter in meters
#' @param Se Emitter spacing in meters
#' @param ne Number of emitters
#' @param dec Slope on the lateral line
#' @param qvr Emitter flow variation
#' @param imax Maximum number of iteration
#' @param DLLa Maximum diameter in meters
#' @param DLLb Minimum diameter in meters
#' @param toler Maximum tolerance
#' @return D diameter, qv emitter flow variation, iter number
#' iterations, tempo time
#' @export
#' @examples
#' lld(Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, Se = 1, ne = 100, dec = 0.00,
#' qvr = 10, imax = 100, toler = 1e-6, DLLa = 1, DLLb = 0)
#' lld(Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, Se = 1, ne = 100, dec = 0.01,
#' qvr = 10, imax = 100, toler = 1e-6, DLLa = 1, DLLb = 0)
#' lld(Hfim = 10, K = 1.053e-6, x = 0.5, Se = 1, ne = 100, dec = -0.01,
#' qvr = 10, imax = 100, toler = 1e-6, DLLa = 1, DLLb = 0)

#Function lld
lld <-
  function(Hfim,
           K,
           x,
           Se,
           ne,
           dec,
           qvr,
           imax = 100,
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 37 - Continuação Script Função *lld*.

```

        toler = 1e-6,
        DLLa = 1,
        DLLb = 0) {

# Time
ptm <- proc.time()

# Initial step
res.a <-
  ll(
    Hfim = Hfim,
    K = K,
    x = x,
    D = DLLa,
    Se = Se,
    ne = ne,
    dec = dec
  )

# calculate f(a)

fDLLa <-
  (qvr - (max(res.a$q) - min(res.a$q)) / max(res.a$q) * 100)

if (fDLLa < 0) {
  stop(
    paste(
      "Não é possível resolver esta condição:",
      "qv inicial =",
      qvr - fDLLa ,
      "qv desejado =",
      qvr
    ),
    call. = FALSE
  )
}
i = 0

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 38 - Continuação Script Função *lld*.

```

# Bisection method
repeat {
  #  $x = (a + b) / 2$ 
  DLLx <- (DLLa + DLLb) / 2
  # Calculate  $f(x)$ 
  res.x <- ll(
    Hfim = Hfim,
    K = K,
    x = x,
    D = DLLx,
    Se = Se,
    ne = ne,
    dec = dec)
  # $f(x)$ 
  fDLLx <-
    (qvr - (max(res.x$q) - min(res.x$q)) / max(res.x$q) * 100)

  # Determine the side
  if (fDLLa * fDLLx < 0) {
    DLLb <- DLLx
    fDLLb <- fDLLx
  } else{
    DLLa <- DLLx
    fDLLa <- fDLLx}
  i = i + 1 # Increase

  # Stop maximum loterance
  if (abs(fDLLx) < toler) {
    break}

  # Stop number maximum iterations
  if (i > imax) {
    break}}
  return (list(
    D = DLLx,
    qv = (qvr - fDLLx),
    iter = i,
    tempo = (proc.time() - ptm)[3]))}

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

APÊNDICE E – Função *llh*

Quadro 39 - Script Função *llh*.

```
#' Establish the pressure head at the end of a lateral line
#'
#' Determine the pressure at the end of the lateral line
#'
#' @param D Diameter in meters
#' @param K Emission coefficient
#' @param x Emission exponent
#' @param Se Emitter spacing in meters
#' @param ne Number of emitters
#' @param dec Slope on the lateral line
#' @param qreq Flow rate required at the emitters in cubic meters per
#'second
#' @param imax Maximum number of iteration
#' @param Hfima Maximum pressure head at the end of the lateral line in
#'mca
#' @param Hfimb Minimum pressure head at the end of the lateral line in
#'mca
#'
#' @return Hfim pressure head at the end of the lateral line, qsistema
#'system flow rate, iter number iterations, tempo time
#'
#' @export
#'
#'
#' @examples
#' llh( D = 0.025, K = 1.053e-6, x = 0.5, Se = 1, ne = 10, dec = 0.0,
#'qreq = 3.333333e-6, imax = 100, toler = 1e-10, Hfima = 30, Hfimb = 0)
#' llh( D = 0.025, K = 1.053e-6, x = 0.5, Se = 1, ne = 10, dec = 0.04,
#'qreq = 3.333333e-6, imax = 100, toler = 1e-10,Hfima = 30, Hfimb = 0)
#' llh( D = 0.025, K = 1.053e-6, x = 0.5, Se = 1, ne = 10, dec = -0.04,
#'qreq = 3.333333e-6, imax = 100, toler = 1e-10,Hfima = 30, Hfimb = 0)
# Function llh
llh <- function(D,
                K,
                x,
                Se,
                ne,
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 40 - Continuação Script Função *llh*.

```

        dec,
        qreq,
        imax = 100,
        toler = 1e-10,
        Hfima = 100,
        Hfimb = 0) {

# Time
ptm <- proc.time()

#Initial step
res.a <-
  ll(
    Hfim = Hfima,
    K = K,
    x = x,
    D = D,
    Se = Se,
    ne = ne,
    dec = dec
  )

# Calcule f(a)
fHfima <- (qreq - mean(res.a$q))

if (fHfima > 0)
{
  stop(
    paste(
      "Não foi possível resolver esta condição:",
      "vazão inicial =",
      qreq - fHfima ,
      "vazão desejado =",
      qreq
    ),
    call. = FALSE
  )
}
}

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 41- Continuação Script Função llh.

```

# Bisection method
repeat {
  #  $x = (a + b) / 2$ 
  Hfimx <- (Hfima + Hfimb) / 2

  # Calculate  $f(x)$ 
  res.x <-
    ll(
      Hfim = Hfimx,
      K = K,
      x = x,
      D = D,
      Se = Se,
      ne = ne,
      dec = dec)

  # $f(x)$ 
  fHfimx <- (qreq - mean(res.x$q))
  # Determine the side
  if (fHfima * fHfimx < 0) {
    Hfimb<- Hfimx
    fHfimb <- fHfimx
  } else{
    Hfima <- Hfimx
    fHfima <- fHfimx}
  i = i + 1 # Increase

  # Stop maximum loterance
  if (abs(fHfimx) < toler) {
    break}

  # Stop number maximum iterations
  if (i > imax) {
    break}}
return (list(
  Hfim = Hfimx,
  qsistema = abs(qreq - fHfimx),
  iter = i,
  tempo = (proc.time() - ptm)[3]))}

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

APÊNDICE F – Função *llhd*

Quadro 42 - Script Função *llhd*.

```
#' Established the diameter and pressure required at the end of a
lateral line
#'
#' Determine a linha lateral e o diâmetro de pressão necessários no
#' início de uma linha lateral
#' @param D Diameter in meters
#' @param K Emission coefficient
#' @param x Emission exponent
#' @param Se Emitter spacing in meters
#' @param ne Number of emitters
#' @param dec Slope on the lateral line
#' @param qreq Flow rate required at the emitters in cubic meters per
#' second
#' @param imax Maximum number of iteration
#' @param toler Maximum tolerance
#' @param qvr Emitter flow variation
#' @return D diameter, Hfim pressure head at the end of the lateral #'
#' line, iter number of iterations, tempo time
#' @export
#' @examples
#' llhd( D = 0.25, K = 1.053e-6, x = 0.5, Se = 1, ne = 10, dec = 0.00,
#' qreq = 3.33333e-6, imax = 100, toler = 1e-10, qvr = 10)
#' llhd( D = 0.25, K = 1.053e-6, x = 0.5, Se = 1, ne = 10, dec = 0.04,
#' qreq = 3.33333e-6, imax = 100, toler = 1e-10, qvr = 10)
#' llhd( D = 0.25, K = 1.053e-6, x = 0.5, Se = 1, ne = 10, dec = 0.04,
#' qreq = 3.33333e-6, imax = 100, toler = 1e-10, qvr = 10)

# Function llhd
llhd <- function( D,
                  K,
                  x,
                  Se,
                  ne,
                  dec,
                  qreq,
                  imax = 100,
                  toler = 1e-6,
                  qvr) {
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 43 - Continuação Script Função *llhd*.

```

# Time

ptm <- proc.time()
i = 0
a = 0
c = 0

# Calculate pressure latral line
repeat{
  resb.llh <-
    llh(
      D = D,
      K = K,
      x = x,
      Se = Se,
      ne = ne,
      dec = dec,
      qreq = qreq,
      imax = 100,
      toler = 1e-10,
      Hfima = 100,
      Hfimb = 0)
  b <- resb.llh$iter

# Number iterations
  a = a + b

# Calculate diameter
  resb.llld <- lld(
    Hfim = resb.llh$Hfim,
    K = K,
    x = x,
    Se = Se,
    ne = ne,
    dec = dec,
    qvr = qvr,
    imax = 100,
    toler = 1e-6,
    DLLa = 1,
    DLLb = 0)

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 44 - Continuação Script Função *llhd*.

```

# Result number iterations
d <- resb.llh$iter

# Number iterations
c = c + d

# Difference
AD <- abs ( D - resb.lld$D )

# Result diameter
D <- resb.lld$D

# Stop maximum loterance
if( AD < toler)
{
  break
}

#Incremento
i = i + 1

if (i > imax)
{
  break
}
}

return(
  list(
    D = D,
    Hfim = resb.llh$Hfim,
    iter = a + c,
    tempo = (proc.time() - ptm)[3]
  )
)

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

APÊNDICE G – Função *subuni*

Quadro 45 - Script Função *subuni*.

```
#' Define an irrigation subunit with lateral line and the manifold
#'#'
#'#' Calculation of the pressure head and flow rate profile a subunit
#'#'
#'#' @param HfimLD Pressure at the end of the manifold in mca
#'#' @param K Emission coefficient
#'#' @param x Emission exponent
#'#' @param DLL Diameter lateral line in meters
#'#' @param DLD Diameter manifold in meters
#'#' @param SeLD Lateral line spacing in meters
#'#' @param SeLL Emitter spacing in meters
#'#' @param neLL Number of lateral lines in meters
#'#' @param ne Number of emitters in meters
#'#' @param dec Slope on the lateral line
#'#'
#'#' @return h Pressure profile and q flow rate profile
#'#'
#'#' @export
#'#' @examples
#'#' subuni(HfimLD = 15, K = 1.053e-6, x = 0.5, DLL = 0.025, DLD = 0.040,
#'#' SeLD = 4, SeLL = 1, nLL = 10, ne = 100, dec = 0.0)
# Function subuni
subuni <-
  function (
    HfimLD,
    K,
    x,
    DLL,
    DLD,
    SeLD,
    SeLL,
    nLL,
    ne,
    dec) {

# Time
    ptm <- proc.time()
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 46 - Continuação Script Função subuni.

```

# Calculate the coefficients of the lateral line

cc <- coefic(
  K = K,
  x = x,
  D = DLL,
  Se = SeLL,
  ne = ne,
  dec = dec,
  HL = HfimLD)

# Calculate manifold

LD <-ll(
  Hfim = HfimLD,
  K = cc$a,
  x = cc$b,
  D = DLD,
  Se = SeLL,
  ne = nLL,
  dec = dec)

# Calculate lateral lines

LL <-
  sapply(1:nLL, function(y) {
    ll(
      Hfim = (cc$c * LD$H[y]),
      K = K,
      x = x,
      D = DLL,
      Se = SeLL,
      n = ne,
      dec = dec)})

qq <- matrix(unlist(LL[4, ]), ncol = nLL)
hh <- matrix(unlist(LL[3, ]), ncol = nLL)

return(list(
  "q" = qq,
  "h" = hh,
  tempo = (proc.time() - ptm)[3]))}

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

APÊNDICE H – Função *subunid*

Quadro 47 - Script Função *subunid*.

```
#' Establish the diameter of a manifold as a function of flow
#'variation the a subunit
#'
#' Set the diameter of a lateral line
#'
#' @param HfimLD Pressure at the end of the manifold in mca
#' @param DLL Diameter lateral line in meters
#' @param K Emission coefficient
#' @param x Emission exponent
#' @param SeLL Emitter spacing in meters
#' @param SeLD Lateral line spacing in meters
#' @param nLL Number of lateral lines in meters
#' @param ne Number of emitters in meters
#' @param dec Slope on the lateral line
#' @param qvr Emitter flow variation
#' @param imax Maximum number of iteration
#' @param DLLa Maximum diameter in meters
#' @param DLLb Minimum diameter in meters
#' @param toler Maximum tolerance
#
#' @return D diameter manifold, qv emitter flow variation, iter number
iterations, tempo time
#'
#' @export
#' @examples
#' subunid(HfimLD = 10, DLL = 0.025, K = 1.053e-6, x = 0.5, SeLL = 1,
#'SeLD = 4, nLL = 10, ne = 100, qvr = 10, dec = 0.00, imax = 100,
#'toler = 1e-6, DLLa = 1, DLLb = 0)
#' subunid(HfimLD = 10, DLL = 0.025, K = 1.053e-6, x = 0.5, SeLL = 1,
#'SeLD = 4, nLL = 10, ne = 100, qvr = 10, dec = 0.01, imax = 100,
#'toler = 1e-6, DLLa = 1, DLLb = 0)
#' subunid(HfimLD = 10, DLL = 0.025, K = 1.053e-6, x = 0.5, SeLL = 1,
#'SeLD = 4, nLL = 10, ne = 100, qvr = 10, dec = -0.01, imax = 100,
#'toler= 1e-6, DLLa = 1, DLLb = 0)
#' subunid(HfimLD = 20, DLL = 0.025, K = 1.053e-6, x = 0.5, SeLL = 1,
#'SeLD = 4, nLL = 10, ne = 100, qvr = 10, dec = -0.01, imax = 100,
#'toler = 1e-6, DLLa = 1, DLLb = 0)
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 48 - Continuação Script Função *sudunid*.

```

# Function subunid
subunid <- function(
    HfimLD,
    DLL,
    K,
    x,
    SeLL,
    SeLD,
    nLL,
    ne,
    dec,
    qvr = 10,
    imax = 100,
    toler = 1e-6,
    DLDa = 1,
    DLDb = 0)
{

    # Time
    ptm <- proc.time()

    # Initial step
    res.a <-
        subuni(
            HfimLD,
            DLL = DLL,
            K = K,
            x = x,
            DLD = DLDa,
            SeLL = SeLL,
            SeLD = SeLD,
            nLL = nLL,
            ne = ne,
            dec =dec)

    # Calculate f (a)
    fDLDa <-
        (qvr - (max(res.a$q) - min(res.a$q)) / max(res.a$q) * 100)

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 49 - Continuação Script Função *sudunid*.

```

# Determine the side

if (fDLDa * fDL Dx < 0)
{
  DLDb <- DLDx
  fDLDb <- fDL Dx
}

else
{
  DLDa <- DLDx
  fDLDa <- fDL Dx
}

#Increase

i = i + 1

# Stop maximum loterance

if (abs(fDL Dx) < toler)
{
  break
}

# Stop number maximum iterations

if (i > imax)
{
  break
}

}

return (
  list(
    D = DLDx,
    qv = (qvr - fDL Dx),
    iter = i,
    tempo = (proc.time() - ptm)[3]
  )
)
})

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

APÊNDICE I – Função *subunih*

Quadro 50 - Script Função *subunih*.

```

#'Establish the pressure at the start of a manifold in a subunit in
#'function flow rater required of emissors
#'
#'Establish the pressure head at the end of a manifold in a subunit
#'
#'
#' @param DLL Diameter lateral line in meters
#' @param K Emission coefficient
#' @param x Emission exponent
#' @param DLD Diameter manifold in meters
#' @param SeLL Emitter spacing in meters
#' @param SeLD Lateral line spacing in meters
#' @param nLL Number of lateral lines
#' @param ne Number of emitters
#' @param dec Slope on the lateral line
#' @param qreq Flow rate required at the emitters in cubic meters per
#'second
#' @param imax Maximum number of iteration
#' @param HfimLda Maximum pressure head at the end of the manifold in
#'meters
#' @param HfimLDb Minimum pressure head at the end of the manifold in
#'meters
#' @param toler Maximum tolerance
#'@return HfimLD pressure head at the end of the manifold, qsistema
#'system flow rate, iter number iterations, tempo time
#'
#'@export
#'
#'@examples
#'
#'subunih(DLL = 0.025, K = 1.053e-6, x = 0.5, DLD = 0.04, SeLL = 1,
#'SeLD = 4, nLL = 10, ne = 100, dec = 0.0, qreq = 3.333333e-6,
#'imax = 100, toler = 1e-10, HfimLda = 100, HfimLDb = 0)
#'subunih(DLL=0.025, K = 1.053e-6, x = 0.5, DLD = 0.04, SeLL = 1,
#'SeLD = 4, nLL = 10, ne = 100, dec = 0.01, qreq = 3.333333e-6,
#'imax = 100,toler = 1e-10, HfimLda = 100, HfimLDb = 0)

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 51 - Continuação Script Função *subunih*.

```

# Function subunih
subunih <-
  function(DLL,
           K,
           x,
           DLD,
           SeLL,
           SeLD,
           nLL,
           ne,
           dec,
           qreq,
           imax = 100,
           toler = 1e-10,
           HfimLDa = 100,
           HfimLDb = 0) {

    # Time
    ptm <- proc.time()

    # Initial step
    res.a <-
      subuni(
        HfimLD = HfimLDa,
        K = K,
        x = x,
        DLL = DLL,
        DLD = DLD,
        SeLL = SeLL,
        SeLD = SeLD,
        nLL = nLL,
        ne = ne,
        dec = dec)

    # Calculate f(a)

    fHfimLDa <- (qreq - mean(res.a$q))
    # Parar se não confinar a raiz, fDLLa tem que ter valor positivo

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 52 - Continuação Script Função *subunih*.

```

    if (fHfimLDa > 0) {
      stop(
        paste(
          "Não é possível resolver está condição:",
          "vazao inicial =",
          qreq - fHfimLDa ,
          "vazao desejado =",
          qreq
        ),
        call. = FALSE
      )
    }

# Loop
i = 0

# Bisection method
repeat {

  #  $x = (a + b) / 2$ 
  HfimLDx <- (HfimLDa + HfimLDb) / 2

  # Calculate  $f(x)$ 
  res.x <-
    subuni(
      HfimLD = HfimLDx,
      K = K,
      x = x,
      DLL = DLL,
      DLD = DLD,
      SeLL = SeLL,
      SeLD = SeLD,
      nLL = nLL,
      ne = ne,
      dec = dec)

  #  $f(x)$ 
  fHfimLDx <-
    (qreq - mean(res.x$q))

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 53 - Continuação Script Função *subunih*.

```

# Determine the side
if (fHfimLDa * fHfimLDx < 0)
{
  HfimLDb<- HfimLDx
  fHfimLDb <- fHfimLDx
}
else
{
  HfimLDa <- HfimLDx
  fHfimLDa <- fHfimLDx
}

#Increase
i = i + 1

# Stop maximum loterance
if (abs(fHfimLDx) < toler)
{
  break
}

# Stop number maximum iterations
if (i > imax)
{
  break
}
}

return (
  list(
    Hfim = HfimLDx,
    qsis = abs(qreq - fHfimLDx),
    iter = i,
    tempo = (proc.time() - ptm)[3]

  ))
}

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

APÊNDICE J – Função *subunihd*

Quadro 54 - Script Função *subunihd*.

```
#' Established to set the diameter lateral line and pressure required at
#'the start a subunit
#'
#'
#' Set the diameter lateral line and pressure required at the start a
#'subunit
#'
#'
#' @param DLL Diameter lateral line in meters
#' @param K Emission coefficient
#' @param x Emission exponent
#' @param DLD Diameter manifold in meters
#' @param SeLL Emitter spacing in meters
#' @param SeLD Lateral line spacing in meters
#' @param nLL Number of lateral lines
#' @param ne Number of emitters
#' @param dec Slope on the lateral line
#' @param qreq Flow rate required at the emitters in cubic meters per
#'second
#' @param imax Maximum number of iteration
#' @param qvr Emitter flow variation
#' @param toler Maximum tolerance
#'
#'
#'
#' @return D diameter lateral line, pressure head at the end, iter
#'number of iterations, tempo time
#'
#'
#' @export
#'
#' @examples
#'
#' subunihd(DLL = 0.025,K = 1.053e-6,x = 0.5,DLD = 0.04,SeLL = 4,
#'SeLD = 1, nLL = 100, ne = 10, dec = 0.00, qreq = 3.33333e-6,
#' imax = 100, toler = 1e-6, qvr = 10)
```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 55 - Continuação Script Função *subunihd*.

```

# Function subunihd
subunihd <- function(
    DLL,
    K,
    x,
    DLD,
    SeLL,
    SeLD,
    nLL,
    ne,
    dec,
    qreq,
    imax = 100,
    toler = 1e-6,
    qvr) {

# Time
ptm <- proc.time()
i = 0
a = 0
c = 0

# Calculate pressure
repeat{
    resb.subunih <- subunih(
        DLL=DLL,
        K = K,
        x = x,
        DLD = DLL,
        SeLL = SeLL,
        SeLD = SeLD,
        nLL = nLL,
        ne = ne,
        dec = dec,
        qreq = qreq,
        imax = 100,
        toler = 1e-10,
        HfimLDa = 100,
        HfimLDb = 0)

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).

Quadro 56 - Continuação Script Função *subunidh*.

```

b <- resb.subunih$iter
a = a + b # Number iterations
# Calculate diameter
resb.subunid <- subunid(
  HfimLD = resb.subunih$Hfim,
  DLL = DLL,
  K = K,
  x = x,
  SeLL = SeLL,
  SeLD = SeLD,
  nLL = nLL,
  ne = ne,
  qvr = qvr,
  dec = dec,
  imax = 100,
  toler = 1e-6,
  DLDa = 1,
  DLDb = 0)

d <- resb.subunid$iter
c = c + d # Number iterations
AD <- abs(DLL - resb.subunid$D)
DLL <- resb.subunid$D

# Stop maximum loterance
if( AD < toler){
  break}
i = i + 1

# Stop number maximum iterations
if (i > imax) {
  break}}

return(list(
  D = DLL,
  Hfim = resb.subunih$Hfim,
  iter = a + c,
  tempo = (proc.time() - ptm)[3]))}

```

Fonte: Elaborada pela autora (2018).